

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

CARRERA ELÉCTRICA

**SELECCIÓN TÉCNICA ECONÓMICA DE UNIDADES DE
GENERACIÓN TÉRMICAS CON RESTRICCIÓN DE DISPONIBILIDAD
DE COMBUSTIBLE Y EMISIÓN DE GASES CONTAMINANTES**

**TEMA PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
ELÉCTRICO**

JUAN CARLOS REAL ESPINOSA

DIRECTOR: Ing. VÍCTOR OREJUELA

Quito, ABRIL 2011.

DECLARACIÓN

Yo, Juan Carlos Real Espinosa, declaro bajo juramento que el trabajo descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en éste documento.

A través de la presente declaración cedo los derechos de propiedad intelectual correspondientes a éste trabajo, a la Universidad Politécnica Salesiana, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Juan Carlos Real Espinosa.

CERTIFICACIÓN

Certifico que el señor Juan Carlos Real Espinosa, bajo mi dirección ha concluido a entera satisfacción su Tesis de Grado cuyo tema es “SELECCIÓN TÉCNICA ECONÓMICA DE UNIDADES DE GENERACIÓN TÉRMICAS CON RESTRICCIÓN DE DISPONIBILIDAD DE COMBUSTIBLE Y EMISIÓN DE GASES CONTAMINANTES”

Por lo que puede proseguir con el proceso de graduación.

Ing. Víctor Orejuela
DIRECTOR DE TESIS

AGRADECIMIENTO

En primer lugar a mis padres, Maritza Espinosa y Oswaldo Real, quienes son mi apoyo en todo momento, depositando su entera confianza en cada reto que se me presenta sin dudar ni un solo momento de mis habilidades y a todos aquellos que me ayudaron de una u otra forma durante mi carrera de ingeniería.

En segundo lugar al Ing. Santiago Espinosa, el cual me prestó su valiosa ayuda intelectual e información necesaria; también al Ing. Víctor Orejuela, por el tiempo prestado para dar los criterios y sugerir recomendaciones para el proyecto de tesis presente.

Y finalmente un entero agradecimiento a ésta prestigiosa Universidad la cual abre sus puertas a jóvenes como nosotros, preparándonos para un futuro competitivo y formándonos como personas de bien.

DEDICATORIA

La concepción de este proyecto de tesis está dedicada a mi familia, y en especial a mi hijo Juan David Real Moncayo, quien es la luz en mi camino, alentándome a mirar hacia adelante, por él soy capaz de cruzar barreras para darle ejemplo, y decirle que la vida no se mide por el número de años pasados, sino por los logros que se han realizado.

CONTENIDO

CAPÍTULO 1	- 1 -
OBJETIVOS Y ALCANCE	- 1 -
1.1 INTRODUCCIÓN.....	- 1 -
1.2 OBJETIVOS.....	- 3 -
1.2.1 Generales.	- 3 -
1.2.2 Específicos.....	- 3 -
1.3 ALCANCES.....	- 4 -
CAPITULO 2	- 5 -
DESPACHO ECONÓMICO.....	- 5 -
2.1 CENTRALES DE GENERACIÓN TÉRMICA A VAPOR.....	- 5 -
2.1.1 CLASIFICACIÓN DE CENTRALES DE GENERACIÓN TÉRMICAS.	- 6 -
2.1.1.1 CENTRALES TÉRMICAS CONVENCIONALES.....	- 6 -
2.1.1.2 CENTRALES TÉRMICAS NO CONVENCIONALES	- 8 -
2.1.2 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LAS CENTRALES TÉRMICAS.....	- 9 -
2.2 COSTOS FIJOS Y COSTOS VARIABLES.	- 10 -
2.2.1 INTRODUCCIÓN.....	- 10 -
2.2.2 CONCEPTO DE COSTO.....	- 11 -
2.2.3 TIPOS DE COSTOS	- 11 -
2.2.3.1 COSTOS FIJOS.....	- 12 -
2.2.3.2 COSTOS VARIABLES	- 13 -
2.3 RESTRICCIONES AMBIENTALES Y DE COMBUSTIBLE	- 14 -
2.3.1 INTRODUCCIÓN.....	- 14 -
2.3.2 RESTRICCIÓN AMBIENTAL.....	- 14 -
2.3.3 CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS.....	- 15 -
2.3.3.1 MONÓXIDO DE CARBONO (CO).	- 15 -
2.3.3.2 DIÓXIDO DE CARBONO (CO ₂).	- 16 -
2.3.3.3 MATERIAL PARTICULADO RESPIRABLE (PM10).	- 16 -
2.3.3.4 DIÓXIDO DE AZUFRE (SO ₂).	- 17 -
2.3.3.5 DIÓXIDO DE NITRÓGENO (NO ₂).	- 17 -
2.3.4 RESTRICCIÓN DE COMBUSTIBLE.....	- 18 -
2.3.4.1 PROGRAMACIÓN A LARGO, MEDIANO Y CORTO PLAZO.	- 18 -
2.3.4.2 PLAN DE CONTINGENCIA ENERGÉTICA.	- 21 -
2.3.4.3 DESCRIPCIÓN DE LAS FASES DEL PLAN DE CONTINGENCIA ENERGÉTICA.	- 22 -
2.4 DESPACHO ECONÓMICO.....	- 23 -
2.4.1. COSTO INCREMENTAL.	- 26 -
2.5 PROGRAMACIÓN LINEAL – ENTERA – MIXTA.....	- 28 -
2.5.1 PROGRAMACIÓN LINEAL.	- 28 -
2.5.1.1 DEFINICIÓN DE PROGRAMACIÓN LINEAL.	- 29 -

2.5.1.2 REGIONES FACTIBLES Y SOLUCIÓN ÓPTIMA.	- 29 -
2.5.1.3 CASOS ESPECIALES DE PROGRAMACIÓN LINEAL.	- 30 -
2.5.2 PROGRAMACIÓN ENTERA.	- 32 -
2.5.2.1 TIPOS DE PROGRAMACIÓN ENTERA.	- 32 -
2.5.2.2 DEFINICIÓN DE PROGRAMACIÓN ENTERA.	- 34 -
2.5.2.3 RESTRICCIONES DE LA PROGRAMACIÓN ENTERA.	- 35 -
2.5.2.4 MÉTODO DE RAMIFICACIÓN Y ACOTAMIENTO PARA RESOLVER PROBLEMAS DE PROGRAMACIÓN ENTERA PURA.	- 36 -
2.5.2.5 MÉTODO DE RAMIFICACIÓN Y ACOTAMIENTO PARA RESOLVER PROBLEMAS DE PROGRAMACIÓN MIXTA.	- 38 -
CAPITULO 3	- 39 -
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y METODOLOGÍA DE SOLUCIÓN	- 39 -
3.1 SELECCIÓN TÉCNICA ECONÓMICA DE UNIDADES.	- 39 -
3.1.1 FUNCIÓN OBJETIVO.	- 39 -
3.1.1.1 FUNCIÓN COSTO DE ARRANQUE.	- 40 -
3.1.1.2 FUNCIÓN COSTO VARIABLE.	- 40 -
3.2 RESTRICCIONES GLOBALES E INDIVIDUALES.	- 41 -
3.2.1 RESTRICCIONES GLOBALES.	- 41 -
3.2.1.1 RESTRICCIÓN DE BALANCE DE POTENCIA ACTIVA.	- 42 -
3.2.1.2 RESTRICCIÓN DE RESERVA DE POTENCIA.	- 42 -
3.2.2 RESTRICCIONES INDIVIDUALES.	- 43 -
3.2.2.1 LÍMITE DE GENERACIÓN DE POTENCIA ACTIVA.	- 43 -
3.2.2.2 TIEMPO MÍNIMO DE SALIDA.	- 43 -
3.2.2.3 TIEMPO MÍNIMO DE OPERACIÓN.	- 44 -
3.2.2.4 VARIACIÓN DE TOMA DE CARGA.	- 45 -
3.2.2.5 TIEMPO MÁXIMO DE OPERACIÓN.	- 46 -
3.2.2.6 DISPONIBILIDAD DE COMBUSTIBLE.	- 46 -
3.2.2.7 CUOTA ENERGÉTICA HIDRÁULICA.	- 47 -
3.2.2.8 RESTRICCIÓN DE EMISIÓN DE DIÓXIDO DE CARBONO.	- 48 -
3.3 MÉTODO DE SELECCIÓN TÉCNICA ECONÓMICA DE UNIDADES DE GENERACIÓN TERMOELÉCTRICAS.	- 50 -
3.4 MÉTODO MATEMÁTICO.	- 53 -
CAPITULO 4	- 57 -
ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	- 57 -
4.1 INTRODUCCIÓN:	- 57 -
4.2 CASO BASE: CUOTA HIDRÁULICA BAJA.	- 60 -
4.3 CASO UNO: CUOTA HIDRÁULICA BAJA Y DISPONIBILIDAD DE COMBUSTIBLE DIESEL.	- 65 -
4.4 CASO DOS: CUOTA HIDRÁULICA BAJA Y DISPONIBILIDAD DE COMBUSTIBLE DIESEL MÍNIMA.	- 72 -
4.5 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.	- 79 -

4.5.1 SENSIBILIDAD ANTE LA DISPONIBILIDAD DE COMBUSTIBLE	80 -
4.5.2 SENSIBILIDAD ANTE LA CUOTA ENERGÉTICA.	83 -
4.5.3 SENSIBILIDAD ANTE LA EMISIÓN DE CO ₂	85 -
4.6 EVALUACIÓN DE RESULTADOS.....	87 -
4.6.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LOS CASOS DE ESTUDIO.	87 -
4.6.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA SENSIBILIDAD ANTE LA DISPONIBILIDAD DE COMBUSTIBLE.....	89 -
4.6.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA SENSIBILIDAD ANTE LA CUOTA ENERGÉTICA. -	91 -
4.6.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA SENSIBILIDAD ANTE EMISIÓN DE CO ₂	93 -
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	95 -
5.1 CONCLUSIONES.....	95 -
5.2 RECOMENDACIONES.	97 -
6. BIBLIOGRAFÍA.....	98 -
ANEXO 1	99 -
INSTALACIÓN DEL PROGRAMA OPTIMIZADOR GAMS	99 -
INSTALACIÓN DE LA BASE DE DATOS PARA LA SELECCIÓN TÉCNICA ECONÓMICA DE UNIDADES TÉRMICAS	100 -
USO DE LA MACRO PARA LA SOLUCIÓN DE LA SELECCIÓN TÉCNICA ECONÓMICA DE UNIDADES TÉRMICAS	101 -
ANEXO 2.....	105 -
ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD ANTE LA DISPONIBILIDAD DE COMBUSTIBLE DIESEL	105 -
ANEXO 3	115 -
ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD ANTE LA VARIACIÓN DE LA CUOTA HIDROELÉCTRICA DE PAUTE.	115 -
ANEXO 4.....	125 -
ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD ANTE LA EMISIÓN DE CO ₂	125 -

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Proceso de una central de generación térmica a vapor.	- 6 -
Gráfica 2. Esquema de un ciclo combinado.	- 8 -
Gráfica 3. Curva de entrada salida para una unidad de generación	- 25 -
Gráfica 4. Soluciones óptimas múltiples.	- 30 -
Gráfica 5. PL no factible.	- 31 -
Gráfica 6. PL no acotada.	- 31 -
Gráfica 7. Conjunto de soluciones factibles de una PE	- 34 -
Gráfica 8. Árbol final de ramificación y acotamiento para problemas de programación pura.	- 37 -
Gráfica 9. Árbol final de ramificación y acotamiento para problemas de programación mixta.	- 38 -
Gráfica 10. Diagrama de flujo de la selección técnica económica de unidades termoeléctricas.	- 51 -
Gráfica 11. Diagrama de flujo del simulador matemático GAMS.	- 52 -
Gráfica 12. Selección de casos de estudio.	- 58 -
Gráfica 13. Casos para el análisis de sensibilidad.	- 59 -
Gráfica 14. Curva de demanda para la selección técnica económica de unidades de generación térmicas.	- 60 -
Gráfica 15. Selección técnica económica de unidades de generación térmicas de acuerdo al tipo de combustible, Caso Base.	- 61 -
Gráfica 16. Emisiones de CO ₂ horarias por tipo de combustible, Caso Base.	- 62 -
Gráfica 17. Porcentaje de emisiones de CO ₂ totales, Caso Base.	- 63 -
Gráfica 18. Pantalla de ingreso y salida de la selección técnica económica de unidades termoeléctricas, Caso Base.	- 64 -
Gráfica 19. Selección técnica económica de unidades de generación térmicas de acuerdo al tipo de combustible, Caso Uno sin restricción de emisión de dióxido de carbono.	- 65 -
Gráfica 20. Emisiones de CO ₂ horarias por tipo de combustible, Caso Uno sin restricción de emisión de dióxido de carbono.	- 66 -
Gráfica 21. Porcentaje de emisiones de CO ₂ totales, Caso Uno sin restricción de emisión de dióxido de carbono.	- 67 -
Gráfica 22. Pantalla de ingreso y salida de la selección técnica económica de unidades termoeléctricas, Caso Uno sin restricción de emisión de dióxido de carbono.	- 68 -
Gráfica 23. Selección Técnica económica de unidades de acuerdo al tipo de combustible, Caso Uno con restricción de emisión de dióxido de carbono.	- 69 -
Gráfica 24. Emisiones de CO ₂ horarias por tipo de combustible, Caso Uno con restricción de emisión de dióxido de carbono.	- 70 -
Gráfica 25. Porcentaje de emisiones de CO ₂ totales, Caso Uno con restricción de emisión de dióxido de carbono.	- 70 -
Gráfica 26. Pantalla de ingreso y salida de la selección técnica económica de unidades termoeléctricas, Caso Uno con restricción de emisión de dióxido de carbono.	- 71 -
Gráfica 27. Selección Técnica económica de unidades de acuerdo al tipo de combustible, Caso Dos sin restricción de emisión de dióxido de carbono.	- 72 -
Gráfica 28. Emisiones de CO ₂ horarias por tipo de combustible, Caso Dos sin restricción de emisión de dióxido de carbono.	- 73 -
Gráfica 29. Porcentaje de emisiones de CO ₂ totales, Caso Dos sin restricción de emisión de dióxido de carbono.	- 74 -
Gráfica 30. Pantalla de ingreso y salida de la selección técnica económica de unidades termoeléctricas, Caso Dos sin restricción de emisión de dióxido de carbono.	- 75 -
Gráfica 31. Selección Técnica económica de unidades de acuerdo al tipo de combustible, Caso Dos con restricción de emisión de dióxido de carbono.	- 76 -
Gráfica 32. Emisiones de CO ₂ horarias por tipo de combustible, Caso Dos con restricción de emisión de dióxido de carbono.	- 77 -
Gráfica 33. Porcentaje de emisiones de CO ₂ totales, Caso Dos con restricción de emisión de dióxido de carbono.	- 77 -

Gráfica 34. Pantalla de ingreso y salida de la selección técnica económica de unidades termoeléctricas, Caso Dos con restricción de emisión de dióxido de carbono.	- 78 -
Gráfica 35. Áreas de estudio para el análisis de sensibilidad.	- 79 -
Gráfica 36. Resumen, Sensibilidad ante la disponibilidad de combustible.	- 82 -
Gráfica 37. Resumen, Sensibilidad ante la cuota hidráulica.	- 85 -
Gráfica 38. Resumen, Sensibilidad ante la emisión de CO ₂ .	- 87 -
Gráfica 39. Resumen de los casos de estudio.	- 88 -
Gráfica 40. Costo total del U.C. en función de la disponibilidad de combustible diesel, Sensibilidad ante la disponibilidad de combustible diesel.	- 89 -
Gráfica 41. Costo total del U.C. en función de la emanación de CO ₂ , Sensibilidad ante la disponibilidad de combustible diesel.	- 90 -
Gráfica 42. Costo total del U.C. en función de la cuota hidroeléctrica, Sensibilidad ante la cuota hidráulica.	- 91 -
Gráfica 43. Costo total del U.C. en función de la emanación de CO ₂ , Sensibilidad ante la cuota hidráulica.	- 92 -
Gráfica 44. Costo total en función de la emisión de CO ₂ , Sensibilidad ante la emanación de CO ₂ .	- 93 -
Gráfica 45. Ruta de instalación de la licencia de GAMS.	- 99 -
Gráfica 46. Presentación del menú principal y la base de datos.	- 100 -
Gráfica 47. Aplicación GDXVIEWER.	- 102 -
Gráfica 48. Exportar la variable "p" hacia EXCEL	- 102 -
Gráfica 49. Guardar la salida de datos.	- 103 -
Gráfica 50. Selección Técnica económica de unidades de acuerdo al tipo de combustible, Sensibilidad ante la disponibilidad de combustible, Caso 1.	- 105 -
Gráfica 51. Emisiones de CO ₂ horarias por tipo de combustible, Sensibilidad ante la disponibilidad de combustible, Caso 1.	- 105 -
Gráfica 52. Porcentaje de emisiones de CO ₂ totales, Sensibilidad ante la disponibilidad de combustible, Caso 1.	- 106 -
Gráfica 53. Selección Técnica económica de unidades de acuerdo al tipo de combustible, Sensibilidad ante la disponibilidad de combustible, Caso 2.	- 107 -
Gráfica 54. Emisiones de CO ₂ horarias por tipo de combustible, Sensibilidad ante la disponibilidad de combustible, Caso 2.	- 107 -
Gráfica 55. Porcentaje de emisiones de CO ₂ totales, Sensibilidad ante la disponibilidad de combustible, Caso 2.	- 108 -
Gráfica 56. Selección Técnica económica de unidades de acuerdo al tipo de combustible, Sensibilidad ante la disponibilidad de combustible, Caso 3.	- 109 -
Gráfica 57. Emisiones de CO ₂ horarias por tipo de combustible, Sensibilidad ante la disponibilidad de combustible, Caso 3.	- 109 -
Gráfica 58. Porcentaje de emisiones de CO ₂ totales, Sensibilidad ante la disponibilidad de combustible, Caso 3.	- 110 -
Gráfica 59. Selección Técnica económica de unidades de acuerdo al tipo de combustible, Sensibilidad ante la disponibilidad de combustible, Caso 4.	- 111 -
Gráfica 60. Emisiones de CO ₂ horarias por tipo de combustible, Sensibilidad ante la disponibilidad de combustible, Caso 4.	- 111 -
Gráfica 61. Porcentaje de emisiones de CO ₂ totales, Sensibilidad ante la disponibilidad de combustible, Caso Cuatro.	- 112 -
Gráfica 62. Selección Técnica económica de unidades de acuerdo al tipo de combustible, Sensibilidad ante la disponibilidad de combustible, Caso 5.	- 113 -
Gráfica 63. Emisiones de CO ₂ horarias por tipo de combustible, Sensibilidad ante la disponibilidad de combustible, Caso 5.	- 113 -
Gráfica 64. Porcentaje de emisiones de CO ₂ totales, Sensibilidad ante la disponibilidad de combustible, Caso 5.	- 114 -
Gráfica 65. Selección Técnica económica de unidades de acuerdo al tipo de combustible, Sensibilidad ante la cuota hidráulica, Caso 1.	- 115 -

Gráfica 66. Emisiones de CO ₂ horarias por tipo de combustible, Sensibilidad ante la cuota hidráulica, Caso 1.	- 115 -
Gráfica 67. Porcentaje de emisiones de CO ₂ totales, Sensibilidad ante la cuota hidráulica, Caso 1.	_____ - 116 -
Gráfica 68. Selección Técnica económica de unidades de acuerdo al tipo de combustible, Sensibilidad ante la cuota hidráulica, Caso 2.	_____ - 117 -
Gráfica 69. Emisiones de CO ₂ horarias por tipo de combustible, Sensibilidad ante la cuota hidráulica, Caso 2.	- 117 -
Gráfica 70. Porcentaje de emisiones de CO ₂ totales, Sensibilidad ante la cuota hidráulica, Caso 2.	_____ - 118 -
Gráfica 71. Selección Técnica económica de unidades de acuerdo al tipo de combustible, Sensibilidad ante la cuota hidráulica, Caso 3.	_____ - 119 -
Gráfica 72. Emisiones de CO ₂ horarias por tipo de combustible, Sensibilidad ante la cuota hidráulica, Caso 3.	- 119 -
Gráfica 73. Porcentaje de emisiones de CO ₂ totales, Sensibilidad ante la cuota hidráulica, Caso 3.	_____ - 120 -
Gráfica 74. Selección Técnica económica de unidades de acuerdo al tipo de combustible, Sensibilidad ante la cuota hidráulica, Caso 4.	_____ - 121 -
Gráfica 75. Emisiones de CO ₂ horarias por tipo de combustible, Sensibilidad ante la cuota hidráulica, Caso 4.	- 121 -
Gráfica 76. Porcentaje de emisiones de CO ₂ totales, Sensibilidad ante la cuota hidráulica, Caso 4.	_____ - 122 -
Gráfica 77. Selección Técnica económica de unidades de acuerdo al tipo de combustible, Sensibilidad ante la cuota hidráulica, Caso 5.	_____ - 123 -
Gráfica 78. Emisiones de CO ₂ horarias por tipo de combustible, Sensibilidad ante la cuota hidráulica, Caso 5.	- 123 -
Gráfica 79. Porcentaje de emisiones de CO ₂ totales, Sensibilidad ante la cuota hidráulica, Caso 5.	_____ - 124 -
Gráfica 80. Selección Técnica económica de unidades de acuerdo al tipo de combustible, Sensibilidad ante la emisión de CO ₂ , Caso 1.	_____ - 125 -
Gráfica 81. Emisiones de CO ₂ horarias por tipo de combustible, Sensibilidad ante la emisión de CO ₂ , Caso 1.	- 125 -
Gráfica 82. Porcentaje de emisiones de CO ₂ totales, Sensibilidad ante la emisión de CO ₂ , Caso 1.	_____ - 126 -
Gráfica 83. Selección Técnica económica de unidades de acuerdo al tipo de combustible, Sensibilidad ante la emisión de CO ₂ , Caso 2.	_____ - 127 -
Gráfica 84. Emisiones de CO ₂ horarias por tipo de combustible, Sensibilidad ante la emisión de CO ₂ , Caso 2.	- 127 -
Gráfica 85. Porcentaje de emisiones de CO ₂ totales, Sensibilidad ante la emisión de CO ₂ , Caso 2.	_____ - 128 -
Gráfica 86. Selección Técnica económica de unidades de acuerdo al tipo de combustible, Sensibilidad ante la emisión de CO ₂ , Caso 3.	_____ - 129 -
Gráfica 87. Emisiones de CO ₂ horarias por tipo de combustible, Sensibilidad ante la emisión de CO ₂ , Caso 3.	- 129 -
Gráfica 88. Porcentaje de emisiones de CO ₂ totales, Sensibilidad ante la emisión de CO ₂ , Caso 3.	_____ - 130 -

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Coeficientes de emisión de CO ₂	- 49 -
Tabla 2. Total de emisiones de CO ₂ por tipo de combustible, Caso Base	- 63 -
Tabla 3. Total de emisiones de CO ₂ por tipo de combustible, Caso Uno sin restricción de emisión de dióxido de carbono.	- 67 -
Tabla 4. Total de emisiones de CO ₂ por tipo de combustible, Caso Uno con restricción de emisión de dióxido de carbono.	- 71 -
Tabla 5. Total de emisiones de CO ₂ por tipo de combustible, Caso Dos sin restricción de emisión de dióxido de carbono.	- 74 -
Tabla 6. Total de emisiones de CO ₂ por tipo de combustible, Caso Dos con restricción de emisión de dióxido de carbono.	- 78 -
Tabla 7. Datos de entradas y salidas del CASO 1 para el U.C. análisis de sensibilidad ante la disponibilidad de combustible diesel.	- 80 -
Tabla 8. Datos de entradas y salidas del CASO 2 para el U.C. análisis de sensibilidad ante la disponibilidad de combustible diesel.	- 81 -
Tabla 9. Datos de entradas y salidas del CASO 3 para el U.C. análisis de sensibilidad ante la disponibilidad de combustible diesel.	- 81 -
Tabla 10. Datos de entradas y salidas del CASO 4 para el U.C. análisis de sensibilidad ante la disponibilidad de combustible diesel.	- 81 -
Tabla 11. Datos de entradas y salidas del CASO 5 para el U.C. análisis de sensibilidad ante la disponibilidad de combustible diesel.	- 82 -
Tabla 12. Datos de entradas y salidas del CASO 1 para el U.C. análisis de sensibilidad ante la cuota hidráulica de la central Paute.	- 83 -
Tabla 13. Datos de entradas y salidas del CASO 2 para el U.C. análisis de sensibilidad ante la cuota hidráulica de la central Paute.	- 83 -
Tabla 14. Datos de entradas y salidas del CASO 3 para el U.C. análisis de sensibilidad ante la cuota hidráulica de la central Paute.	- 84 -
Tabla 15. Datos de entradas y salidas del CASO 4 para el U.C. análisis de sensibilidad ante la cuota hidráulica de la central Paute.	- 84 -
Tabla 16. Datos de entradas y salidas del CASO 5 para el U.C. análisis de sensibilidad ante la cuota hidráulica de la central Paute.	- 84 -
Tabla 17. Datos de entradas y salidas del CASO 1 para el U.C. análisis de sensibilidad ante la emisión de CO ₂ .	- 86 -
Tabla 18. Datos de entradas y salidas del CASO 2 para el U.C. análisis de sensibilidad ante la emisión de CO ₂ .	- 86 -
Tabla 19. Datos de entradas y salidas del CASO 3 para el U.C. análisis de sensibilidad ante la emisión de CO ₂ .	- 86 -
Tabla 20. Total de emisiones de CO ₂ por tipo de combustible, Sensibilidad ante la disponibilidad de combustible, Caso 1.	- 106 -
Tabla 21. Total de emisiones de CO ₂ por tipo de combustible, Sensibilidad ante la disponibilidad de combustible, Caso 2.	- 108 -
Tabla 22. Total de emisiones de CO ₂ por tipo de combustible, Sensibilidad ante la disponibilidad de combustible, Caso 3.	- 110 -
Tabla 23. Total de emisiones de CO ₂ por tipo de combustible, Sensibilidad ante la disponibilidad de combustible, Caso 4.	- 112 -
Tabla 24. Total de emisiones de CO ₂ por tipo de combustible, Sensibilidad ante la disponibilidad de combustible, Caso 5.	- 114 -
Tabla 25. Total de emisiones de CO ₂ por tipo de combustible, Sensibilidad ante la cuota hidráulica, Caso 1.	- 116 -
Tabla 26. Total de emisiones de CO ₂ por tipo de combustible, Sensibilidad ante la cuota hidráulica, Caso 2.	- 118 -

<i>Tabla 27. Total de emisiones de CO₂ por tipo de combustible, Sensibilidad ante la cuota hidráulica, Caso 3.</i>	<i>___ - 120 -</i>
<i>Tabla 28. Total de emisiones de CO₂ por tipo de combustible, Sensibilidad ante la cuota hidráulica, Caso 4.</i>	<i>___ - 122 -</i>
<i>Tabla 29. Total de emisiones de CO₂ por tipo de combustible, Sensibilidad ante la cuota hidráulica, Caso 5.</i>	<i>___ - 124 -</i>
<i>Tabla 30. Total de emisiones de CO₂ por tipo de combustible, Sensibilidad ante la emisión de CO₂, Caso 1.</i>	<i>___ - 126 -</i>
<i>Tabla 31. Total de emisiones de CO₂ por tipo de combustible, Sensibilidad ante la emisión de CO₂, Caso 2.</i>	<i>___ - 128 -</i>
<i>Tabla 32. Total de emisiones de CO₂ por tipo de combustible, Sensibilidad ante la emisión de CO₂, Caso 3.</i>	<i>___ - 130 -</i>

ÍNDICE DE FÓRMULAS

[1] Costo de arranque	- 40 -
[2] Costo variable	- 41 -
[3] Balance de potencia	- 42 -
[4] Reserva de potencia	- 42 -
[5] Límite de generación	- 43 -
[6] Tiempo mínimo de salida	- 43 -
[7] Tiempo mínimo de operación.....	- 44 -
[8] Rampa de subida	- 45 -
[9] Rampa de bajada	- 46 -
[10] Tiempo máximo de operación.....	- 46 -
[11] Disponibilidad de combustible	- 46 -
[12] Rangos de disponibilidad de combustible	- 47 -
[13] Cuota hidráulica	- 47 -
[14] Emisión de CO ₂	- 48 -

CAPÍTULO 1

OBJETIVOS Y ALCANCE

1.1 INTRODUCCIÓN.

El planificador de la operación del un sistema eléctrico de potencia tiene la dificultad de decidir cómo resolver el problema de la cobertura de una demanda que varía en función del tiempo. De acuerdo a las políticas energéticas y el horizonte de estudio, se considera la selección de unidades como una opción estratégica para resolver el problema de despacho, en la cual las centrales eléctricas disponibles tienen que estar en línea cumpliendo ciertas características operativas y técnicas.

La selección del despacho de las unidades de generación o Unit Commitment (U.C.), se refiere a la planificación óptima que se realizará para determinar cuál de las centrales eléctricas disponibles se deben considerar para proveer electricidad, por lo tanto el U.C. prepara un sistema de plantas de generación, las mismas que tienen una amplia variedad de parámetros, de aspectos tecnológicos (tales como tiempo mínimo de la operación, tiempo mínimo fuera de la operación, el tiempo máximo de operación, etc.) así como consideraciones económicas (tales como costos de arranque, costos de combustible y costos operacionales) y de elementos sociales (tales como disponibilidad del personal, emisión de gases contaminantes, entre otras) y estipula en qué período tienen que estar en línea y listas para ser despachadas para así reducir al mínimo los costos de la generación eléctrica.

La formulación matemática y la resolución de la selección de unidades son complejas ya que el carácter matemático de la misma es de tipo combinatoria de alta dimensionalidad del espacio de solución. Existiendo un número exponencial de soluciones enteras factibles; esto implica el uso de variables de decisión binarias (0-1) para representar el estado del generador. Su método de solución es mediante programación lineal-entero-mixta. La mayoría de los modelos de U.C. que se han desarrollado anteriormente soportaban hasta un

máximo de cincuenta a setenta unidades generadoras para realizar la optimización; y, para encontrar una solución factible se requería el uso de técnicas heurísticas que podían hasta un cierto punto garantizar un óptimo global. El desarrollo de la tecnología computacional, cada vez más avanzada, ha hecho que este impedimento se haya eliminado; y en la actualidad, para el sistema de potencia que se necesite optimizar, no hay límite en el número de centrales eléctricas a ser consideradas.

La función objetivo de este proceso de optimización es minimizar el costo total del sistema, que considera el costo variable de operación y el costo de arranque; la cual se encuentra sujeta a restricciones, y tienen la siguiente clasificación:

- Restricciones globales:
 - Balance de potencia activa.
 - Reserva de potencia.

- Restricciones individuales:
 - Límite de generación de potencia activa.
 - Tiempo mínimo de salida y de operación.
 - Variación de toma de carga.
 - Rampa mínima de subida y bajada.
 - Tiempo máximo de operación.
 - Cuota energética.
 - Disponibilidad de combustible.
 - Restricción ambiental.

El horizonte de tiempo es de una programación a corto plazo (desde algunas horas hasta 7 días), períodos mayores son inadecuados debido al carácter estocástico de variables como la demanda, el estado del tiempo, la disponibilidad de unidades o elementos del sistema.

Las restricciones antes descritas serán modeladas a través del programa optimizador GAMS, el mismo que, mediante el uso de sus “solvers” permitirá resolver el problema

mediante la programación lineal-entera-mixta; adicionalmente este software permite realizar modificaciones en las variables que se deseen para poder establecer el análisis de sensibilidad requerido para una toma de decisiones.

Cabe indicar que el optimizador GAMS mantendrá una interfaz con el programa Microsoft EXCEL, todo esto para que los datos puedan ser modificados de forma dinámica y de la misma forma para que los resultados de la optimización sean mostrados de forma gráfica y comprensible.

1.2 OBJETIVOS.

1.2.1 Generales.

Establecer una metodología de la selección de unidades en un sistema térmico, considerando las restricciones impuestas por la disponibilidad de combustibles y por la emisión de gases contaminantes; además, optimizar el uso de los recursos fósiles para la generación térmica a través de la modelación matemática que considera el empleo eficiente del combustible.

1.2.2 Específicos.

Determinar los principales contaminantes atmosféricos que producen las centrales térmicas y sus efectos.

Analizar los efectos que causan la indisponibilidad de combustibles y las emisiones de gases contaminantes, en la selección de unidades de generación térmica.

Plantear el problema de selección de unidades considerando las restricciones tanto de disponibilidad de combustibles así como de las emisiones de gases contaminantes, y resolverlo utilizando programación lineal – entera – mixta mediante el paquete de optimización GAMS (General Algebraic Modeling System).

Realizar ejemplo de aplicación al caso ecuatoriano; para establecer conclusiones y recomendaciones.

1.3 ALCANCES.

Se modelará el sistema de generación térmica sin tomar en cuenta la red de transmisión, para determinar la selección óptima de unidades, considerando la minimización del costo operativo, incluido el costo de arranque de las unidades.

Una vez resuelto el problema de la selección de unidades, se realizaran análisis de sensibilidad considerando los siguientes aspectos: disponibilidad de combustibles, y, emisiones de gases contaminantes. Se completarán los análisis con ejemplos de aplicación al caso ecuatoriano.

CAPITULO 2

DESPACHO ECONÓMICO

2.1 CENTRALES DE GENERACIÓN TÉRMICA A VAPOR.

Las centrales de generación térmicas a vapor son las que utilizan como principio el ciclo termodinámico de agua-vapor; se genera el vapor a partir del agua que circula por una extensa red de tubos que cubren las paredes de la caldera, el cual hace girar los álabes de la turbina de vapor que consta de tres cuerpos unidos por un mismo eje; el primer cuerpo es el de alta presión el que está formado por centenares de alabes pequeños, el segundo cuerpo es el de media presión que posee centenares de alabes pero de mayor tamaño que los anteriores y el último cuerpo es el de baja presión que tiene alabes más grande que los precedentes; “el objetivo de la triple disposición es la de poder aprovechar el máximo la fuerza del vapor”¹ previamente deshumificado.

El eje del rotor gira solidariamente acoplado de manera mecánica con el de un generador que produce la energía eléctrica; esta energía se transporta mediante líneas de alta tensión hacia una subestación elevadora, para luego ser enviada a largas distancias donde se encuentran los sitios de consumo.

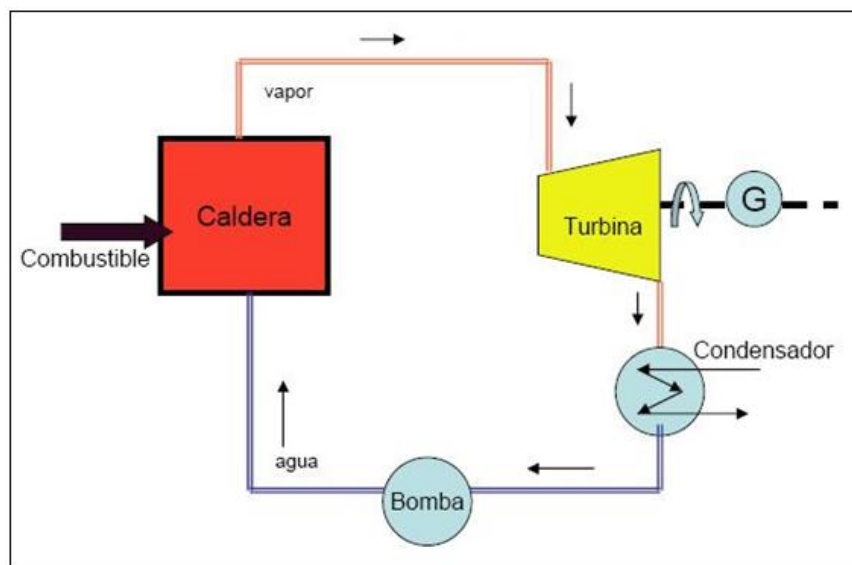
El vapor que se usó en la turbina, es enfriado mediante un condensador y convertido nuevamente en agua, el cual vuelve a la tubería de la caldera, de ésta manera se genera un ciclo cerrado.

El agua que circula para la refrigeración del condensador desaloja el calor hacia la atmósfera por medio de las torres de enfriamiento, y parte del calor extraído llega a un río próximo o al mar; las torres de enfriamiento son enormes cilindros, que emanan de forma constante vapor de agua, no contaminante, a la atmósfera.

¹ www.monografias.com/trabajos16/central-termica/central-termica.shtml

Para tratar de eliminar en parte los efectos contaminantes de la combustión sobre el entorno, la central dispone de una chimenea de gran altura que pueden llegar a los 300 m.

A continuación se presenta el proceso simplificado que lleva a cabo una central térmica a vapor.



Gráfica 1. Proceso de una central de generación térmica a vapor².

2.1.1 CLASIFICACIÓN DE CENTRALES DE GENERACIÓN TÉRMICAS.

Las centrales de generación térmicas se clasifican de la siguiente manera:

2.1.1.1 CENTRALES TÉRMICAS CONVENCIONALES

- **Centrales Térmicas de Carbón**

Este tipo de centrales térmicas usan como combustible principal el carbón, son aquellas que pueden quemarlo en trozos o pulverizado. Al usar el carbón pulverizado, la combustión se controla más fácil y es mejor.

² <http://web.ing.puc.cl/~power/alumno06/RealOptions/merc1.html>

En este tipo de centrales se requiere instalar mecanismos para separar las cenizas que son el producto de la combustión y van hacia el exterior; por lo tanto existe “un incremento de efecto invernadero por su combustión, altos costos de inversión, bajo rendimiento y arranque lento”³.

- **Centrales Térmicas de Fuel-Oíl**

El Fuel-Oíl es un residuo del petróleo que se obtiene de la destilación fraccionada del mismo y es uno de los más pesados, por tal motivo necesita un precalentamiento, para que pueda fluir con normalidad hacia la caldera, una vez allí, el proceso de generación de energía eléctrica es exactamente como se describe en las unidades a vapor.

Al utilizar el Fuel-Oíl como combustible, éste tipo de centrales se encuentran sujetas a la variación del precio del petróleo, puesto que su principal fuente de energía es un derivado del mismo.

En éste tipo de centrales con frecuencia “se exigen tratamientos de desulfuración de los humos para evitar en cierta forma la contaminación y la lluvia ácida”⁴, también se adiciona un arranque lento y un bajo rendimiento

- **Centrales Térmicas de Gas Natural**

En éste tipo de centrales consume gas natural que se encuentra en yacimientos fósiles como su principal combustible para la alimentación de la caldera, con lo cual se calienta el agua que circula por el serpentín que la rodea la misma, produciendo vapor de agua que se encuentra a altas temperaturas y altas presiones, el mismo que produce energía cinética y es transformada en energía eléctrica por medio de un generador.

Estas centrales desalojan menor grado de dióxido de carbono y otros contaminantes hacia la atmosfera, puesto que el combustible usado es gas natural, por tal razón el impacto ambiental producido es menor que los anteriores tipos de centrales

³ www.monografias.com/trabajos33/centrales-termicas/centrales-termicas.shtml

⁴ www.monografias.com/trabajos33/centrales-termicas/centrales-termicas.shtml

2.1.1.2 CENTRALES TÉRMICAS NO CONVENCIONALES

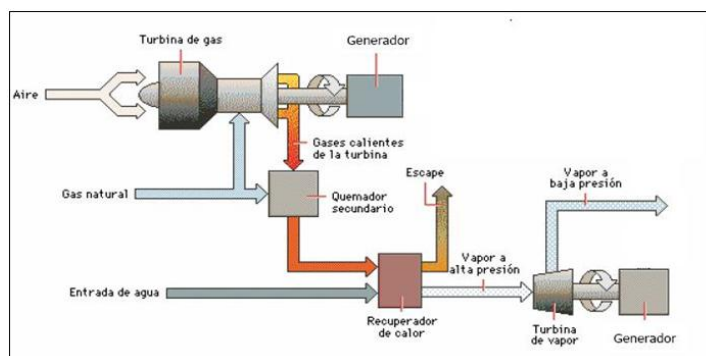
- **Centrales Térmicas de Ciclo Combinado**

Este tipo de centrales usa la combinación de un turbo-grupo de gas y un turbo-grupo de vapor. Sus componentes esenciales son la turbina de gas, la caldera de recuperación y la turbina de vapor.

Su funcionamiento es como sigue: primero se ingresa aire del exterior el cual es comprimido mediante un compresor, luego pasa a la cámara de combustión donde se inyecta el combustible (gas natural) que arde de una manera constante, y los gases de la combustión se expanden hacia los alabes de la turbina de gas que se encuentra acoplada a un generador; por otra parte los gases calientes que salen de la turbina de gas llegan a la caldera de recuperación, donde se inicia el ciclo agua-vapor convencional para llegar a la turbina de vapor, la cual se encuentra acoplada con otro generador.

La tecnología utilizada en estas centrales permite un mayor aprovechamiento del combustible y, por lo tanto, los rendimientos pueden aumentar hasta cerca del 60 por ciento de una central térmica convencional.

En la siguiente gráfica se presenta un esquema representativo de una central de ciclo combinado.



Gráfica 2. Esquema de un ciclo combinado⁵.

⁵ <http://web.ing.puc.cl/~power/alumno06/RealOptions/merc1.html>

Para turbinas a vapor, la temperatura máxima está limitada a unos 540 a 600°C; con respecto a las turbinas de gas se tiene que la temperatura de ingreso de los gases es de unos 1000°C para uso industrial.

La presión máxima que soporta una turbina de vapor es de unos 35 MPa, mientras que para las turbinas a gas se encuentra entre 4 y 2 MPa.

Por tal razón al tener altas presiones de admisión, la turbina de vapor requiere una construcción robusta; mientras que las turbinas de gas son de construcción más ligeras.

2.1.2 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LAS CENTRALES TÉRMICAS.

Las ventajas más importantes de las centrales de generación térmica son las siguientes:

- Tienen un corto tiempo de construcción.
- Este tipo de centrales no dependen de las condiciones climáticas.
- Los costos de inversión son menores, lo que beneficia en su construcción y entrada en funcionamiento.
- Facilidad de transporte del combustible fósil hacia la central.

Entre las principales desventajas se tiene las que siguen a continuación:

- Como producto del procesamiento del carbón, fuel-oil y gas, éstas centrales son potenciales focos emisores de agentes contaminantes, calor, ruido y vibraciones.
- Gran impacto ambiental que produce, ya que emite gases que provocan tanto el efecto invernadero como la lluvia ácida.
- Al momento del transporte del petróleo por medio del mar, su vertido ocasiona las comunes mareas negras.

2.2 COSTOS FIJOS Y COSTOS VARIABLES.

2.2.1 INTRODUCCIÓN.

Básicamente una empresa tiene como meta: “satisfacer necesidades y deseos del cliente vendiéndole un producto o servicio por más dinero (precio) de lo que cuesta fabricarlo o producirlo”⁶; la ventaja que se obtiene con el precio, es que se usa para cubrir los costos del servicio entregado y para obtener una utilidad, por tal razón el conocer los costos de la empresa o planta es un elemento clave.

Las medidas a tomar en una empresa de prestación de servicios involucra de manera especial a sus costos, y para evitar que las decisiones sean una casualidad, sino el resultado de un análisis de las posibles consecuencias, cada una debe ser respaldada por tres importantes aspectos:

1. Saber las consecuencias técnicas económicas de la medida a tomar.
2. Evaluar las incidencias en los costos de la empresa o planta.
3. Calcular el impacto en el sector comercial que atiende la empresa o planta.

“El cálculo de costo es uno de los instrumentos más importantes para la toma de decisiones y se dice que no basta con los conocimientos técnicos adecuados, sino que es necesario considerar la incidencia de cualquier decisión en este sentido y las posibles o eventuales consecuencias que pueda generar”⁷.

El cálculo de costo, es importante en la planificación, la dirección y el control de la empresa o planta y para la determinación de los precios.

⁶ <http://www.infomipyme.com/Docs/GT/Offline/Empresarios>

⁷ <http://www.infomipyme.com/Docs/GT/Offline/Empresarios>

2.2.2 CONCEPTO DE COSTO

El Costo es el esfuerzo o desgaste económico que se debe realizar para la fabricación de un determinado producto o la prestación de algún servicio, el costo de un producto está formado por el precio de la materia prima, precio de mano de obra directa, precio de mano de obra indirecta, y el costo de amortización (pérdida de su valor por el paso del tiempo).

La mano de obra directa es la que se consume en el área de producción, es decir, aquella que generan los obreros y operarios calificados de la empresa; la mano de obra indirecta es la parte administrativa, y que sirve como apoyo para la producción y el comercio.

Al momento de la elaboración de un determinado producto o la prestación de un bien, existen costos y gastos, los dos términos son una erogación monetaria, se expresan como gasto al pago de los servicios básicos, pero el costo es un deterioro gradual de algún mueble.

Por tal motivo “Costo se define como los beneficios sacrificados para obtener bienes y servicios. Un gasto lo define como un costo que ha producido un beneficio y que ya no es vigente. Tanto el costo como el gasto son erogaciones, el costo se destinará a la producción y el gasto a la distribución, administración y financiamiento”⁸.

2.2.3 TIPOS DE COSTOS

Los costos se clasifican de acuerdo a categorías o grupos, de manera tal que posean ciertas características comunes para poder realizar los cálculos, el análisis y presentar la información que puede ser utilizada para tomar decisiones.

La manera en que se clasifican los costos es la siguiente:

Según la función que cumplen:

- Costo de Producción.
- Costo de Comercialización.

⁸ <http://www.mitecnologico.com/Main/DiferenciaEntreCostoYGasto>

- Costo de Administración.

- Costo de financiación.

Según su grado de variabilidad:

- Costos Fijos.

- Costos Variables.

Según su asignación:

- Costos Directos.

- Costos Indirectos.

Según su comportamiento:

- Costo Variable Unitario.

- Costo Variable Total.

- Costo Fijo Total.

- Costo Fijo Unitario.

- Costo Total.

2.2.3.1 COSTOS FIJOS

Son aquellos costos cuyo monto permanece igual, sin importar el nivel de actividad de una empresa o planta. También se puede decir que son los costos para mantener la empresa funcionando.

Los cargos fijos de acuerdo con la regulación **No. CONELEC 013/08** “son los costos necesarios para la instalación y operación de un determinado equipo, independiente de la actividad de producción”⁹.

⁹ <http://www.conelec.gov.ec/normativa>

Para el problema de estudio, los costos fijos están determinados como los costos de arranque de cada una de las centrales generadoras tomadas en consideración.

2.2.3.2 COSTOS VARIABLES

“Costo Variable de Producción es aquel necesario para operar y mantener la unidad o planta generadora y que cambia en función de la energía producida”¹⁰.

De acuerdo con la regulación **No. CONELEC 003/03** *“los componentes del Costo Variable de Producción son:*

- *Combustibles.*
- *Transporte de combustible*
- *Lubricantes, productos químicos y otros insumos para operación*
- *Agua potable*
- *Energía eléctrica para servicios auxiliares*
- *Mantenimientos programados (preventivos y correctivos), durante el ciclo operativo, entre dos mantenimientos mayores, que consideran el valor de los repuestos y otros insumos a utilizarse, así como la mano de obra adicional para la ejecución de dichos mantenimientos.*
- *Costos variables de Operación y mantenimiento de los equipos e instalaciones usados para el control y amortiguamiento de impacto ambiental.*

*No se considerarán aquellos costos correspondientes a mantenimientos destinados a repotenciar las unidades o a prolongar la vida útil original de las unidades generadoras”*¹¹

¹⁰ <http://www.conelec.gov.ec/normativa>

2.3 RESTRICCIONES AMBIENTALES Y DE COMBUSTIBLE

2.3.1 INTRODUCCIÓN

Los combustibles fósiles son: el carbón, el gas natural y el petróleo (también denominado crudo), que son los residuos de organismos vegetales en descomposición petrificados durante millones de años.

Cuando se quema el combustible fósil, su energía química se convierte en energía calórica, la cual se transforma en energía mecánica o eléctrica mediante máquinas como motores o turbinas respectivamente.

2.3.2 RESTRICCIÓN AMBIENTAL.

Las restricciones de tipo ambiental son aquellas que determinan las emanaciones permisibles de elementos tóxicos respirables; el de mayor impacto a la sociedad es el dióxido de carbono, porque es el más ligado a la potencia que genera una central térmica de acuerdo a la demanda que abastece.

El uso de ésta restricción es reciente, ya que en la antigüedad no eran muy tomado en cuenta el impacto ambiental y la mayoría de centrales fueron de tipo hidroeléctrico. Y al no ser considerada una restricción ambiental, se puede despachar de manera económica a una unidad sin importar la cantidad de gases contaminantes que emane hacia la superficie.

Adicionalmente, la quema de combustibles fósiles produce contaminación de tres formas:

- a) Emisión de gases entre los de mayor importancia son: dióxido de carbono (CO_2), dióxido de azufre (SO_2) y óxidos de nitrógeno (NO_x); junto a ello vienen las partículas contaminantes las mismas que causan: el efecto invernadero también conocido como un efecto ambiental global, y las lluvias ácidas que es un efecto ambiental local.

- b) La contaminación del vertimiento de aguas que se utilizan en el proceso de enfriamiento.
- c) Y la emisión de desechos sólidos, los mismos que son los residuos de la combustión del combustible a ser utilizado.

2.3.3 CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS.

Consideramos que se tiene una contaminación atmosférica cuando el aire se encuentra con un grado alto de impurezas en concentraciones dañinas para la salud; “o es capaz de producir una pérdida de bienestar por medio de la acumulación de polvo, suciedad, emanación de olores desagradables, disminución de rayos solares, etc.”¹¹.

De manera seguida se explican brevemente los distintos tipos de contaminantes atmosféricos.

2.3.3.1 MONÓXIDO DE CARBONO (CO).

Es compuesto químico compuesto de carbono y oxígeno, de fórmula CO. Es un gas incoloro e inodoro, adicionalmente es un 3% más ligero que el aire; y que resulta venenoso para los animales de sangre caliente y muchas otras formas de vida.

El CO se produce por la incompleta combustión de carbonatos, o por quemar carbono o sustancias compuestas de carbono con una cantidad insuficiente de aire. Es un gas liviano que en condiciones normales asciende de forma rápida a las capas más altas de la atmósfera, y los aportes principales del monóxido de carbono son los gases que producen los vehículos, también en los hogares se produce por las estufas, las cocinas, y los humos del cigarrillo.

¹¹ <http://web.ing.puc.cl/~power/paperspdf/sepulveda.pdf>

Al ser respirado el CO hace que se disminuya la transportación de oxígeno desde los pulmones hacia los tejidos, lo cual afecta al sistema cardiovascular, por tal motivo es muy peligroso para la salud humana.

2.3.3.2 DIÓXIDO DE CARBONO (CO₂).

Es un gas incoloro, inodoro y con un ligero sabor ácido, cuya molécula consiste en un átomo de carbono unido a dos átomos de oxígeno; es 1,5 veces aproximadamente más densa que el aire y es soluble en agua.

El dióxido de carbono se produce por diversos procesos como: la combustión u oxidación de materiales que contienen carbono; por la fermentación de azúcares, y por la descomposición de los carbonatos bajo la acción del calor o los ácidos.

La generación del CO₂ está muy ligada al funcionamiento de una central térmica, por lo tanto la única forma de reducir la emanación de dióxido de carbono es aumentando al máximo la eficiencia de la planta.

2.3.3.3 MATERIAL PARTICULADO RESPIRABLE (PM10).

El efecto que produce el material particulado depende de su tamaño, puesto que mientras más pequeño produce más daño fundamentalmente al árbol respiratorio.

Las partículas de un diámetro menor a 2.5 [µm] resultan de las emisiones industriales y vehiculares, producto de la combustión; “otros elementos que se encuentran presentes en las partículas son: el plomo, cadmio, berilio, mercurio, sulfatos, nitratos e hidrocarburos policíclicos aromáticos”¹².

¹² <http://web.ing.puc.cl/~power/paperspdf/sepulveda.pdf>

2.3.3.4 DIÓXIDO DE AZUFRE (SO₂).

El SO₂ se da como producto de los procesos donde existe la combustión de los combustibles fósiles como son: gasolina, diesel, carbón, etc., de la fundición de minerales y de diversos procesos industriales.

Por tanto, la exposición a ácidos como a sulfatos son de gran riesgo para la salud, puesto que ingresan de manera directa al sistema humano por medio de las vías respiratorias; también produce corrosión de metales, lo que es perjudicial para todo tipo de maquinaria; y causa un gran daño al ecosistema porque daña los árboles y la vegetación que se encuentra cercana.

2.3.3.5 DIÓXIDO DE NITRÓGENO (NO₂).

Es otro de los productos de la combustión de los combustibles fósiles a muy altas temperaturas; de igual manera, causa enfermedades de tipo respiratorio, tanto en personas asmáticas y en sanos.

El efecto que produce en los metales es la corrosión rápida, cuando los mismos se encuentran en ambientes húmedos.

Una vez visto los principales contaminantes que causa la combustión de combustible fósil, se puede dar cuenta que las restricciones que causan impacto ambiental están basadas en qué tipo de combustible se usa para la generación de la energía termoeléctrica, puesto que de él depende el impacto al que se expone el medio ambiente. A continuación se detallan las restricciones tanto de combustible, y la de emisión de gas contaminante.

2.3.4 RESTRICCIÓN DE COMBUSTIBLE.

Al saber que el combustible es el elemento principal para las centrales de generación térmicas, es necesario saber cómo limita ésta restricción al momento de ser formulada en la selección de las unidades.

En las centrales de generación térmicas, “se presentan recurrentes problemas de abastecimiento de combustibles debido a la falta de recursos económicos de los generadores y a la limitada capacidad de almacenamiento de Petroecuador”¹³.

El abastecimiento del combustible se origina desde los tanques de almacenamiento de PETROCOMERCIAL, de allí se proveen a las centrales de generación térmicas a sus propios tanques de abastecimiento, y el tiempo que tarda en llegar el combustible a cada una de las centrales es diferente.

En primera instancia el CENACE realiza la planificación de operación del SNI, de acuerdo a la programación de los horizontes de tiempo que son de largo, mediano y corto plazo.

2.3.4.1 PROGRAMACIÓN A LARGO, MEDIANO Y CORTO PLAZO.

Esta es una división jerárquica de la planificación de operación del sistema eléctrico, y debe ser tratado de manera secuencial, lo que quiere decir que cada sub-problema realiza la optimización dentro del espacio de tiempo definido por el nivel superior y determina el área de búsqueda para el sub-problema del área inferior.

El horizonte de tiempo de una programación a ***largo plazo*** es aquel que analiza períodos de 2 a 3 años, su objetivo es determinar la operación del parque generador hidro-térmico, de forma tal que el costo sea mínimo dentro del período. Los resultados se usan para planificar una expansión del sector eléctrico, en los estudios tarifarios, en estrategias de movimiento del agua para las centrales hidráulicas y la previsión de combustible para las centrales térmicas.

¹³ <http://bieec.epn.edu.ec:8180/dspace/bitstream/123456789/976/6/T10735CAP1.pdf>

El horizonte de tiempo de una programación a **mediano plazo** es el que analiza períodos de 1 a 2 años en pasos mensuales o semanales, es un modelo con mayor detalle, puesto que usa los datos obtenidos de la programación a largo plazo para centrarse en puntualidades de cada una de las centrales hidráulicas, y el resultado son los valores esperados de los volúmenes de agua turbinados y vertidos, y el progreso del estado de llenado de los embalses.

El horizonte de tiempo de una programación a **corto plazo** es el que analiza períodos de 1 a 7 días (semanal); se descomponen los datos obtenidos del problema anterior de forma diaria, tomando en cuenta los efectos del control de los embalses, retardos de agua entre embalses, control de inundaciones, y el uso del agua que no produce energía eléctrica. Y tiene como objetivo la determinación de la potencia horaria que debe generar cada unidad (térmica e hidráulica) las cuales se encuentran sujetas a restricciones técnicas y de operación.

En los horizontes de largo y mediano plazo los resultados de la planificación que realiza el CENACE son principalmente, la cantidad de combustible que se necesita para el parque generador térmico, la generación de las centrales disponibles, y la evolución de los embalses de las centrales hidráulicas a niveles mensuales y semanales. Mientras que en horizonte a corto plazo se realiza la determinación de la programación de la potencia de manera horaria para el día siguiente.

Por otro lado PETROCOMERCIAL utiliza los datos de la cantidad de combustible tanto a nivel mensual ó semanal que se obtiene por medio del CENACE, para hacer la programación de la compra del mismo, de acuerdo a ciertas características como son:

- La disponibilidad de combustible en las terminales.
- Su importación a nivel nacional.
- Capacidad de almacenamiento de los tanques de cada central.

Luego de programar la compra del combustible, también realiza la programación del medio de transporte del mismo, para lo cual se emplean:

- Poliductos.
- Buques cisterna.
- Auto tanques.

El tipo de transporte a ser usado depende de la topografía y de la forma de acceso a cada una de las centrales térmicas, el cual es un factor muy importante en el tiempo de despacho del combustible desde la terminal hacia cada unidad termoeléctrica.

Por último el CENACE aprueba la programación de combustibles realizada por parte de PETROCOMERCIAL, y hace llegar a cada una de las centrales térmicas para que se empiece a realizar la compra del mismo que puede ser al contado; y mediante crédito cuando suceda algún tipo de emergencia energética.

De acuerdo a las condiciones citadas, cuando el combustible se encuentra sin restricciones, el abastecimiento del mismo es suficiente para cubrir la demanda, pero se pueden dar dos casos que merecen ser analizados; cuando no hay suficiente capacidad de almacenamiento en un terminal de PETROCOMERCIAL, se debe optar por una forma de transporte alternativo para poder llevar el combustible hacia otra de sus terminales; por otra parte si no se encuentra disponible un determinado combustible se debe tomar como decisión alterna la compra de otro derivado a un precio mayor. Cada uno de estos casos afecta a la manera en que se despachan las centrales.

Por tal motivo, el problema merece ser tratado desde dos puntos de vista; el primero se enfoca desde PETROCOMERCIAL que no solamente distribuye al mercado eléctrico, pero en épocas de estiaje el sector eléctrico ocupa un 50% del combustible y se convierte en el ente más representativo de dicha institución, por ésa razón se establece el problema de abastecimiento de combustible de manera global para el Sector Eléctrico tomando en consideración la programación a largo plazo, y como resultado se debe implantar las políticas de manejo de los inventarios en los terminales para abastecer la demanda del parque térmico, y tratar de modo general el manejo de los inventarios en los depósitos de almacenamiento de las centrales térmicas.

El otro punto de vista es el de corto plazo y tendrá características determinantes, en otras palabras, dado el abastecimiento de combustibles determinado por PETROCOMERCIAL y el CENACE, cómo se deberá despachar las unidades de generación térmicas en caso de existir alguna restricción de inventario de combustible en los tanques de almacenamiento de las centrales del parque generador térmico. En éste problema se configura la denominada selección de unidades con restricción de disponibilidad de combustible, y los períodos que se consideran en éste problema son de 1 a 24 horas, lo mismo que se conoce como programación a *muy corto plazo*.

2.3.4.2 PLAN DE CONTINGENCIA ENERGÉTICA.

Las causas primordiales por las que la situación energética actual se encuentra en riesgo son las siguientes:

- La falta de recursos en la producción de energía eléctrica local, para poder atender el crecimiento que sufre la demanda del país.
- Los bajos caudales afluentes hacia las centrales hidráulicas, son los que causan una disminución de energía hidroeléctrica, un aumento en la producción de energía termoeléctrica, y mayor importación de la energía desde Colombia y del Perú.
- Indisponibilidad del parque generador térmico por mantenimientos programados y correctivos, falta de recursos económicos para la adquisición de combustibles (principalmente diesel).

Y los antecedentes para la determinación de un plan de contingencia en el sector eléctrico son determinados en el momento que los niveles energéticos se vuelven críticos, poniendo en riesgo un desabastecimiento nacional de energía eléctrica a corto plazo, los cuales ocurren por las siguientes causas fundamentales:

- Bajos caudales afluentes en la región Amazónica.
- Restricciones para la adquisición de combustibles por parte de las generadoras.

- Falta de generación eléctrica por mantenimientos correctivos.
- Necesidad de recursos económicos para tener una disponibilidad y confiabilidad hacia el parque generador.

Por los motivos señalados anteriormente y de acuerdo a la evaluación de la situación que se presenta en el abastecimiento del sector eléctrico del país, se resuelve lo siguiente.

“El CONELEC, mediante la Regulación No CONELEC 001/05, “Operación del Sistema Nacional Interconectado en condiciones de Déficit de Generación”, dispone que la Corporación Centro Nacional de Control de Energía (CENACE), en su calidad de Administrador Técnico y Comercial del Mercado Eléctrico Mayorista (MEM), prepare un Plan de Contingencia para poder enfrentar adecuada y oportunamente los déficits de energía eléctrica e informe al CONELEC sobre su control y cumplimiento.

El Plan establece la estructura técnico - administrativa interna del CENACE, para determinar medidas previas de ahorro de energía, disponibilidad de generación y, de ser necesario, un programa de racionamiento de energía, conforme lo establece la Regulación No CONELEC 001/05, con el consiguiente seguimiento y control, que permita operar el SNI con los recursos energéticos disponibles en el sistema.”¹⁴

2.3.4.3 DESCRIPCIÓN DE LAS FASES DEL PLAN DE CONTINGENCIA ENERGÉTICA.

El plan de contingencia tiene una estructuración en tres fases:

Fase de Alerta de Déficit.- Se dice que ésta fase es el período en el cual se promueve el ahorro de electricidad por medio de tarifas que visualiza el usuario final y se implantan acciones a cumplir por parte de las Empresas Distribuidoras, CNEL-Regionales y Grandes Consumidores, que son los que tienden a obtener la reducción de la demanda.

¹⁴ PLAN DE CONTINGENCIA CENACE 2009

Fase de Racionamiento.- Es la que corresponde al período de los cortes de servicio eléctrico programados, los cuales son preparados por el CENACE y ejecutados por las Empresas Distribuidoras, CNEL-Regionales, Grandes Consumidores y/o el Transmisor.

Fase de Seguimiento y Mitigación.- Es el resumen de la evaluación en un documento ejecutivo denominado: “Reporte de la Situación Energética“, en el cual se informa sobre las principales variables relacionadas con el abastecimiento de energía eléctrica al país, el mismo que es publicado diariamente para conocimiento del sector eléctrico e instituciones vinculadas y medios de comunicación.

2. 4 DESPACHO ECONÓMICO.

Una operación económica en el sistema eléctrico de potencia tiene su importancia; ya que permite la minimización del costo del kilowatio hora (KWh) hacia los consumidores y también minimiza el costo que representa generar energía eléctrica, de acuerdo a tarifas que imponen las instituciones reguladoras (CONELEC) y al principal cuidado de conservar el combustible para la generación termoeléctrica, lo que obligan a alcanzar una eficiencia máxima.

La operación económica tanto para la generación como para la distribución, es también llamada despacho económico, “el cual hace hincapié en la coordinación de los costos de producción en todas las plantas generadoras”¹⁵.

El problema del despacho económico es aquel que indica la salida de potencia de cada unidad generadora, de tal forma que minimiza el costo total requerido para una determinada demanda, por lo tanto, se debe coordinar los costos de producción de cada una de las unidades que se encuentran funcionando en el sistema; además el **artículo 8** del reglamento de *despacho y operación del sistema nacional interconectado* dice que:

“El CENACE, mediante un modelo aprobado por el CONELEC, calculará el despacho económico horario de los recursos de generación sujetos a despacho central y las

¹⁵ John J. Grainger, William D. Stevenson Jr. Análisis de Sistemas de Potencia, McGraw Hill.

transferencias de energía por interconexiones internacionales, de tal forma que se atienda la demanda horaria y se minimicen los costos de operación, considerando:

- a. La predicción de demanda horaria;*
- b. Los Costos Variables de las Unidades de Generación;*
- c. Las restricciones técnicas que se impongan sobre todo el sistema o una parte de él, incluyendo la generación obligada por criterios de calidad de servicio, seguridad eléctrica o por inflexibilidades en la operación;*
- d. El programa de mantenimiento de las unidades de generación sujetas a despacho central;*
- e. Las proyecciones de importación y exportación de electricidad a través de las interconexiones internacionales;*
- f. El margen de reserva de generación de acuerdo a los criterios de confiabilidad y calidad de servicio establecidos en los Procedimientos de Despacho y Operación;*
y,
- g. Otros aspectos particulares a indicarse en los Procedimientos de Despacho y Operación.*

En lo que se refiere al literal c), el CENACE deberá asegurar que la solución técnica adoptada para levantar la restricción es la más económica, desde el punto de vista de minimizar el costo total de operación del sistema.”¹⁶

Puesto que la demanda es variable en el tiempo, se hace necesario una coordinación en la salida de potencia para lograr un balance entre la carga y la generación, esto se lo hace para que la frecuencia del sistema se encuentre lo más estable posible a 60 Hz, ya que cuando se incrementa carga en el sistema la frecuencia de generación disminuye y viceversa.

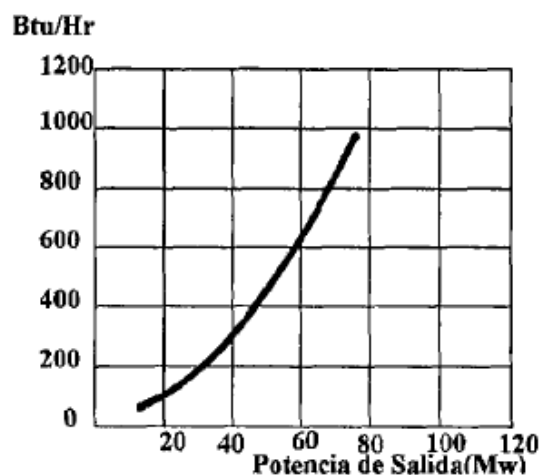
¹⁶ <http://www.conelec.gov.ec/normativa>

“Debido a la diaria variación de la carga, la compañía tiene que decidir, con base en la economía, que generador hay que tener en operación, cual hay que quitar del sistema y en qué orden”¹⁷.

Una forma de pensar, puede llevar a la conclusión de hacer generar a la central térmica más eficiente para la satisfacción de una demanda, y a medida que la carga se incrementa, la segunda central térmica más eficiente empieza a alimentar el sistema.

Pero esta forma de pensar omite las pérdidas por transmisión y la distancia a la que se encuentra la carga de la generación, por consiguiente no se logra minimizar costos.

Por lo tanto para obtener una distribución económica se debe expresar los costos operacionales variables en función de salida de potencia, el principal factor en la generación térmica es el costo del combustible y para su análisis se estudia la curva de entrada salida, la cual se muestra a continuación.



Gráfica 3. Curva de entrada salida para una unidad de generación¹⁸

Esta curva representa que, a una determinada entrada de combustible por hora (Btu/h) se obtendrá una salida de potencia (MW) la cual es entregada por una determinada unidad generadora.

¹⁷ John J. Grainger, William D. Estevenson Jr. Análisis de Sistemas de Potencia, McGraw Hill.

¹⁸ <http://cdigital.dgb.uanl.mx/te/1020119053.pdf>

Al trazar una línea hacia cualquier punto de la curva se obtiene una pendiente, la cual viene dada por la relación de la entrada de combustible y la salida de potencia; ésta pendiente se llama *proporción de calor* o de manera similar se la conoce como *eficiencia de combustible*, y cuando la pendiente de la recta que va desde el origen hacia la curva es la menor se afirma que existe la máxima eficiencia de combustible.

2.4.1. COSTO INCREMENTAL.

Al considerar dos unidades generadoras y despachar una carga, se suscita, que mientras una unidad incrementa su generación la otra decrece hasta que se encuentre en balance la carga con la generación, y esa fluctuación también produce variantes en el costo total del sistema.

Al expresar la entrada de una unidad generadora en dólares por hora (\$/h), lo cual se lo realiza conociendo el costo del Btu y la salida de potencia en MW; la pendiente de la curva determinan los costos incrementales de las unidades generadoras que se encuentren en el sistema de potencia.

Considerando que:

$$f_t = \text{entrada a la unidad } t \left(\frac{\$}{h} \right)$$

$$P_{gt} = \text{salida de potencia de la unidad } t \text{ (Mw)}$$

Y si la curva de entrada salida es cuadrática, se expresa de la siguiente manera:

$$f_t = \frac{a_t}{2} P_{gt}^2 + b_t P_{gt} + c_t \quad \left(\frac{\$}{h} \right)$$

El costo incremental de combustible de una unidad generadora viene dada por el punto más cercano a la pendiente y se define de la siguiente forma.

$$\lambda_t = \frac{df_t}{dP_{gt}}$$

$$\lambda_t = a_t P_{gt} + b_t$$

Por lo tanto al costo incremental se lo puede definir como: el costo en dólares que representa incrementar un megavatio en una hora; el cual se lo determina por medio de la pendiente de la curva de entrada salida, la misma que se multiplica por el costo de cada Btu.

Al usar el criterio de operación económica se establece lo siguiente: para que un grupo de unidades generadoras pueda realizar un despacho económico, todas ellas deben operar bajo un mismo costo incremental de combustible.

Y los términos de la función de entrada para dos unidades generadoras se escriben de la siguiente forma:

$$a_T = \left(\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} \right)^{-1} = \left(\sum_{i=1}^2 \frac{1}{a_i} \right)^{-1}$$

$$b_T = a_T \left(\frac{b_1}{a_1} + \frac{b_2}{a_2} \right) = a_T \left(\sum_{i=1}^2 \frac{b_i}{a_i} \right)$$

$$P_{gT} = (P_{g1} + P_{g2}) = \sum_{i=1}^2 P_{gi}$$

Para el caso de que se encuentren conectadas más de dos unidades al sistema de potencia, los términos anteriores quedan como se muestra a continuación:

$$a_T = \left(\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} + \dots + \frac{1}{a_k} \right)^{-1} = \left(\sum_{i=1}^k \frac{1}{a_i} \right)^{-1}$$

$$b_T = a_T \left(\frac{b_1}{a_1} + \frac{b_2}{a_2} + \dots + \frac{b_k}{a_k} \right) = a_T \left(\sum_{i=1}^k \frac{b_i}{a_i} \right)$$

$$P_{gT} = (P_{g1} + P_{g2} + \dots + P_{gk}) = \sum_{i=1}^k P_{gi}$$

2. 5 PROGRAMACIÓN LINEAL – ENTERA – MIXTA.

2.5.1 PROGRAMACIÓN LINEAL.

La programación lineal es un algoritmo matemático simplex o también conocido como “PL que se usa para resolución de problemas de optimización, muy utilizado en diferentes industrias, bancos, educación, selvicultura, petróleo y transporte de carga”¹⁹.

Todos los problemas de programación lineal comparten las siguientes características:

➤ **VARIABLES DE DECISIÓN.-** Son aquellas variables que deben describir de la forma más completa las decisiones que se deben tomar.

➤ **FUNCIÓN OBJETIVO.-** Es aquella función que toma decisiones, como por lo general para los ingresos o las utilidades debemos *maximizar* puesto que esto genera mayor utilidad para la empresa, y para lo que se refiere a costos o gastos que se genera para la fabricación u obtención de dicho producto se lo debe *minimizar*.

Para la denotación de la función objetivo de cualquier problema de programación lineal se usa la variable “z”, además se utiliza las abreviaciones correspondientes a cada término; para la *maximización* será: “Max”, y para la *minimización* será: “Min”.

➤ **RESTRICCIONES.-** También llamadas limitaciones, son aquellas que restringen las variables de decisión, haciendo que no tomen valores arbitrarios o sumamente grandes, de acuerdo al problema planteado; tomando en cuenta que las restricciones se deben escribir en términos de las variables de decisión, y para que sea razonable todos los términos deben tener las mismas unidades.

➤ **Función lineal.-** Es aquella función $f(X_1, X_2, X_3, ..., X_n)$ que para un conjunto de constantes la cual da como resultado:

$$f(X_1, X_2, X_3, ..., X_n) = C_1 X_1 + C_2 X_2 + C_3 X_3 + ... + C_n X_n$$

➤ **Desigualdad lineal.-** Es aquella función $f(X_1, X_2, X_3, ..., X_n)$ y cualquier número b se tiene como resultado:

¹⁹¹⁹ Pg. 49 Wayne L. Winston, Investigación de Operaciones Aplicación y algoritmos, Cuarta edición

$$f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n) \leq b \quad \text{y} \quad f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n) \geq b$$

2.5.1.1 DEFINICIÓN DE PROGRAMACIÓN LINEAL.

“Un problema de programación lineal (PL) es un problema de optimización para lo cual se efectúa lo siguiente:

Se intenta maximizar (minimizar) una función lineal de las variables de decisión. La función que se desea maximizar o minimizar se llama función objetivo.

Los valores de las variables de decisión deben satisfacer un conjunto de restricciones. Cada restricción debe ser una ecuación lineal o una desigualdad lineal.

Se relaciona una restricción de signo con una variable. Para cualquier X_i , la restricción de signo especifica que X_i no debe ser negativa ($X_i \geq 0$) o no tener restricciones de signo (nrs)”²⁰.

2.5.1.2 REGIONES FACTIBLES Y SOLUCIÓN ÓPTIMA.

Al conjunto de puntos que satisfacen limitaciones y restricciones PL se denomina **región factible**, y cualquier punto que se encuentra fuera de esta región se denomina **punto no factible**, y basta que no cumpla con una de las limitaciones o una de las restricciones para que ese conjunto de puntos sean no factibles.

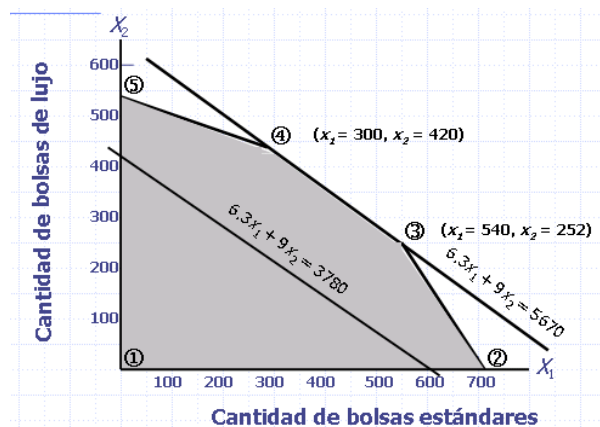
La **solución óptima** de un determinado problema de maximización para la programación lineal es un punto con el valor más grande que toma la función objetivo dentro de la región factible. Para un problema de minimización para la PL la solución óptima es el punto con el valor más pequeño que toma la función objetivo dentro de la región factible.

²⁰ Pg. 53 Wayne L. Winston, Investigación de Operaciones Aplicación y algoritmos, Cuarta edición

2.5.1.3 CASOS ESPECIALES DE PROGRAMACIÓN LINEAL.

PL CON SOLUCIONES ÓPTIMAS MÚLTIPLES

Se dice que un problema de programación lineal tiene soluciones óptimas múltiples o alternas al momento que la recta de la función objetivo llega a ser paralela con cualquiera de los lados donde se encuentra delimitada la región óptima, como se puede visualizar en la siguiente gráfica:



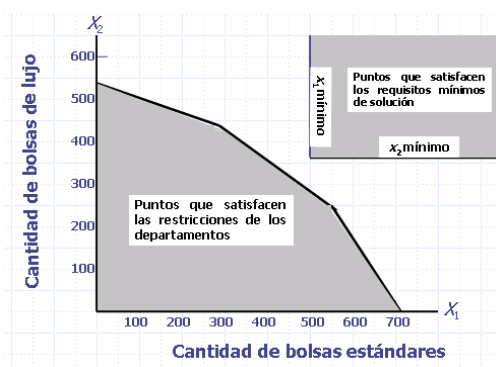
Gráfica 4. Soluciones óptimas múltiples.

Se puede apreciar que la recta de isoutilidades (maximización de la función objetivo) coincide con una arista de la región factible, y todos los puntos que se encuentran dentro del segmento de recta son soluciones óptima, por tal motivo tiene varias soluciones óptimas, y la decisión de elegir entre una de ellas depende del planificador, por supuesto verificando que sea para la obtención de beneficios o la minimización de costos.

PL NO FACTIBLE

Al momento de delimitar un espacio con las restricciones del problema, se obtiene una región factible; y para los problemas de maximización en los cuales la recta de la función objetivo se encuentra fuera de los límites, se dice que la región factible se encuentra vacía, por lo tanto se obtiene como resultado una PL no factible, lo que quiere decir, no existe solución óptima puesto que se va a maximizar la función objetivo de forma infinita al no tener un tope superior.

A continuación se observa una gráfica de programación lineal, en el que las restricciones han formado regiones distintas que no se intersecan.

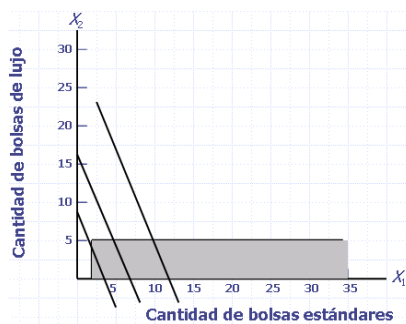


Gráfica 5. PL no factible.

Puesto que las regiones que forman las restricciones no se intersecan con la función a maximizar, se descarta el poder tener alguna solución óptima del problema de programación lineal.

PL NO ACOTADA

En la gráfica 7 se observa que no existe una región óptima porque falta una recta que cierre la zona que forman las restricciones, entonces, en un problema de maximización, si los valores de la recta de isoutilidades (función objetivo a maximizar) toman datos demasiado grandes, la recta va a desplazarse de forma infinita hacia el lado derecho, la solución óptima va a ser un valor demasiado grande; para el caso de un problema de minimización los valores de la recta de isocostos (función objetivo a minimizarse) decrece hasta su valor mínimo la solución óptima es un valor muy pequeño; de tal modo en ningún caso encontramos una solución óptima, una representación gráfica se muestra a continuación.



Gráfica 6. PL no acotada.

2.5.2 PROGRAMACIÓN ENTERA.

Los problemas de programación entera son un alargamiento de los problemas de programación lineal, en donde algunas de las variables toman valores enteros, en algunas situaciones se puede encontrar que solo tienen sentido aquella solución de la región factible donde todas las variables de decisión son enteros no negativos, y se observa que la programación entera (PE) tiene mayor dificultad en la solución que la programación lineal (PL).

2.5.2.1 TIPOS DE PROGRAMACIÓN ENTERA.

La programación entera (PE) es una representación de la programación lineal (PL) pero con más restricciones; de aquí que se consideran los siguientes casos:

PROGRAMACIÓN ENTERA PURA

Una programación entera es pura cuando todas las variables deben ser enteras, lo que quiere decir que toman valores positivos y no fraccionarios, lo cual se aprecia de la siguiente manera:

$$\text{Max } z = 3x_1 + 4x_2$$

$$\text{s. a } x_1 + x_2 \geq 4$$

$$2x_1 - x_2 \leq 7$$

$$x_1, x_2 \geq 0, \quad x_1, x_2 \text{ enteras}$$

La expresión anterior se entiende de la siguiente manera: se desea maximizar la función objetivo $z = 3x_1 + 4x_2$ sujeto a (s. a) restricciones que son desigualdades lineales.

En la parte final de la modelación se observa claramente la manera de restringir a las variables; en la primera parte se definen a x_1 y x_2 como valores mayores o iguales a cero,

esto quiere decir que son números positivos y en la segunda parte se dice que las variables son números enteros, lo cual indica que no pueden ser fracciones.

PROGRAMACIÓN ENTERA COMBINADA

Se dice que una programación entera es combinada cuando se mezclan variables enteras y fraccionarias; en otras palabras, se requiere que solo alguna de las variables sea un número entero, esto se expresa de manera seguida:

$$\text{Max}_z = 3x_1 + 4x_2$$

$$\text{s.a. } x_1 + x_2 \geq 4$$

$$2x_1 - x_2 \leq 7$$

$$x_1, x_2 \geq 0, \quad x_1 \text{ entero}$$

Al final de la modelación matemática se aprecia la definición de las variables positivas, pero en la segunda parte se define una sola de las variables como entero, mientras que la otra variable puede ser fraccionaria.

PROGRAMACIÓN ENTERA BINARIA

Por lo general éste tipo de problema es muy frecuente, puesto que tienen condiciones de estados (como: encendido y apagado), y las variables toman solamente los valores de 0 o 1, lo cual se muestra a continuación.

$$\text{Max}_z = 3x_1 + 4x_2$$

$$\text{s.a. } x_1 + x_2 \geq 4$$

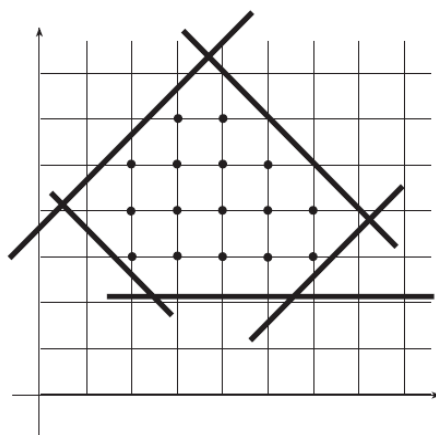
$$2x_1 - x_2 \leq 7$$

$$x_1, x_2 = 0 \text{ o bien } 1$$

Al final de la modelación matemática se puede apreciar la manera de definir que las variables sean binarias, esto se lo hace tomando solamente los datos de la numeración binaria (0 ó 1).

2.5.2.2 DEFINICIÓN DE PROGRAMACIÓN ENTERA.

La programación entera también se la puede definir como una relajación de la programación lineal, lo cual implica quitar las restricciones de tipo binario y entero; entonces “se dice que la región factible para un problema de programación entera debe de estar contenido en la región factible para la relajación del problema de la programación lineal”²¹, como se indica en la gráfica siguiente.



Gráfica 7. Conjunto de soluciones factibles de una PE

En la gráfica 7 se puede mirar la región de posibles soluciones factibles que forman las restricciones de un determinado problema, y dentro de ésta región se encuentra un conjunto de puntos, los mismos son los valores enteros de las variables de decisión; de acuerdo a la pendiente que tenga la recta de la función objetivo y si se desea maximizar o minimizar, la recta se va a acercar a cualquier vértice de la región factible, donde la solución óptima se encuentra en uno de los puntos cercanos de dicho vértice, solo en casos muy probables se tiene que la solución factible es el redondeo de un problema de programación lineal.

²¹ Pg. 476 Wayne L. Winston, Investigación de Operaciones Aplicación y algoritmos, Cuarta edición

Se dice que el valor óptimo de la función objetivo para la relajación de una PL (programación lineal) es menor o igual que el valor óptimo de la función objetivo para la PE (programación entera).

De manera teórica se podría resolver una PE mediante la enumeración de los valores de “z” para cada uno de los puntos factibles; por lo tanto la solución óptima serán los pares de puntos donde el valor de “z” sea el más grande. Lo cual es una forma muy larga, puesto que los problemas reales de PE tienen regiones factibles que consideran billones de puntos factibles.

2.5.2.3 RESTRICCIONES DE LA PROGRAMACIÓN ENTERA.

RESTRICCIONES INCLUSIVAS O DISTRIBUTIVAS.-

Cuando existen dos restricciones de la forma:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0$$

$$g(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0$$

Y se debe dar cumplimiento de manera segura por lo menos a una de las dos restricciones; la formulación que se la es de la siguiente forma:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq My$$

$$g(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq M(1 - y)$$

Se aclara que y es una variable binaria (0 o 1) y M es un número lo suficientemente grande para asegurar que se cumplan las dos restricciones.

RESTRICCIONES SI... ENTONCES.-

Este tipo de restricciones dan la certeza de que “si $f(x_1, x_2, \dots, x_n) \geq 0$ se satisface, entonces la restricción $g(x_1, x_2, \dots, x_n) \geq 0$ se tiene que cumplir, en tanto que $f(x_1, x_2, \dots, x_n) > 0$ no se cumpla la restricción $g(x_1, x_2, \dots, x_n) \geq 0$ se podrá o no satisfacer”²². Para lo citado anteriormente se tiene la siguiente formulación:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq M(1 - y)$$

$$-g(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq My$$

El valor de la variable y es binario (0 o 1), mientras que el valor de M debe ser positivo y suficientemente grande para que se cumplan las restricciones.

2.5.2.4 MÉTODO DE RAMIFICACIÓN Y ACOTAMIENTO PARA RESOLVER PROBLEMAS DE PROGRAMACIÓN ENTERA PURA.

El método de ramificación y acotamiento consiste en la enumeración exhaustiva de los puntos que se encuentran en la región factible, expresado de otra manera, se cuenta con todos los puntos donde las variables de decisión son enteras, haciendo una semejanza con un plano cartesiano, las variables de decisión se comparan con las coordenadas x - y en donde los valores que se toman son netamente enteros.

Primero se realiza la relajación del problema de programación entera (PE), esto quiere decir: suprimir las restricciones de tipo entero y binario encontradas en la última parte de la modelación matemática del problema, para que sea un problema de programación lineal (PL relajado).

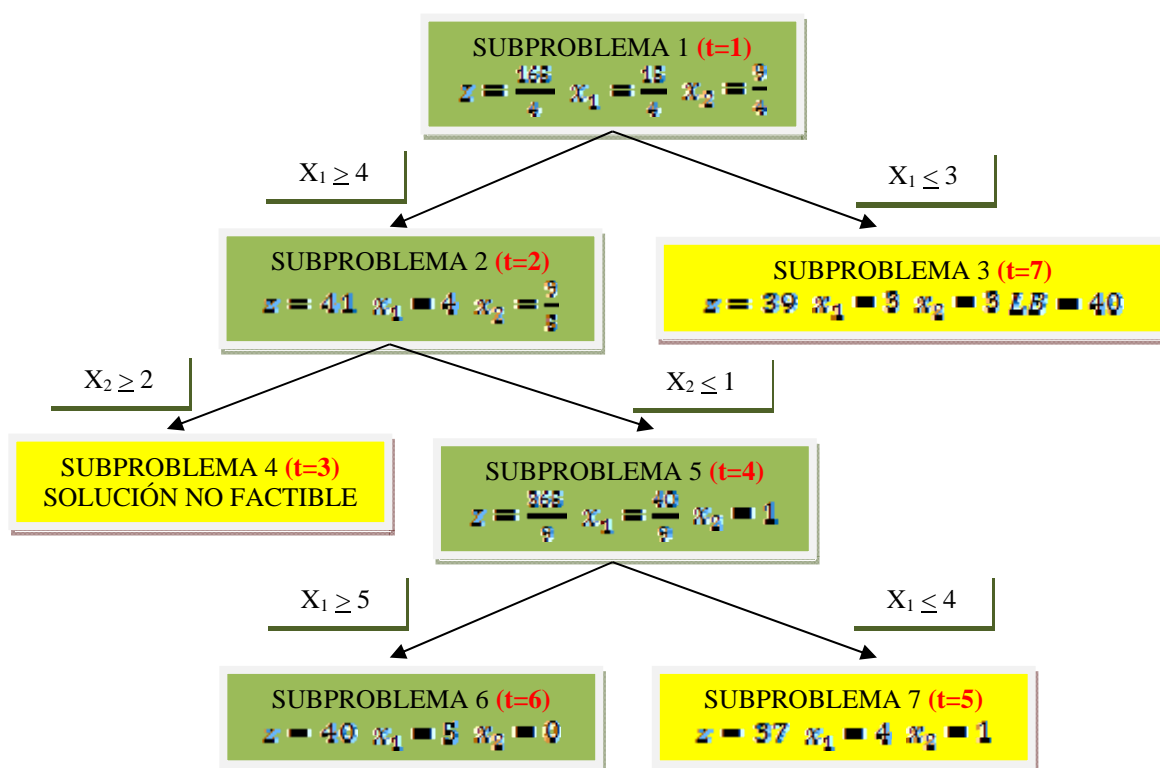
Luego se toma en cuenta el criterio siguiente: *el valor óptimo de la función objetivo “ z ” para el problema de programación entera (PE) es menor o igual que el valor óptimo de la función objetivo “ z ” para la relajación del problema de programación lineal (PL relajado)*, y por lo tanto el valor de la relajación llega a ser un **límite o acotamiento superior** para el problema de programación entera planteado.

²² Pg. 490 Wayne L. Winston, Investigación de Operaciones Aplicación y algoritmos, Cuarta edición

De manera seguida, se toma aleatoriamente una variable que sea fraccionaria en la relajación del PL, entonces el problema se **ramifica** en dos sub problemas adicionales.

Nuevamente se selecciona de manera arbitraria un sub problema que no haya sido tratado como un PL, y ahora se ramifica sobre la otra variable y nuevamente se generan dos sub problemas.

En la gráfica 8 se aprecia la manera de acotar un problema de programación entera hasta encontrar la solución óptima del mismo.



Gráfica 8. Árbol final de ramificación y acotamiento para problemas de programación pura.

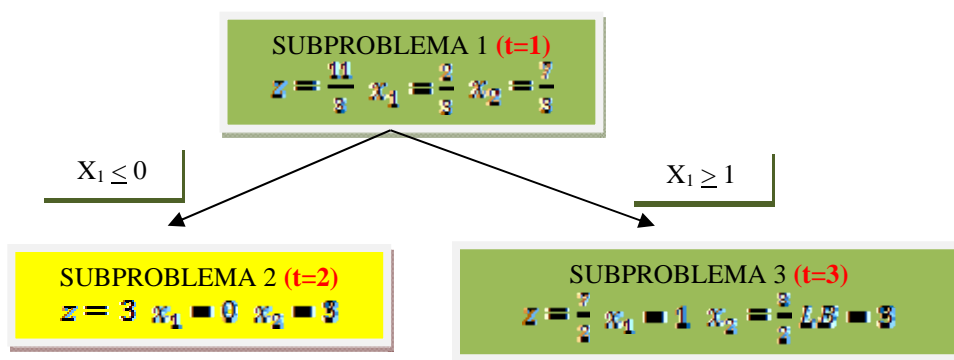
A la representación de todos los sub problemas originados se denomina *árbol*, cada uno de los sub problemas se los llama *nodos* y la línea que une dos nodos del árbol se nombra como *arco*.

2.5.2.5 MÉTODO DE RAMIFICACIÓN Y ACOTAMIENTO PARA RESOLVER PROBLEMAS DE PROGRAMACIÓN MIXTA.

Este tipo de problemas son aquellos en donde algunas de las variables sean enteros y otras pueden ser no enteros; para la solución de los PE mixtos se modifica la antigua descripción.

Primero hay que realizar la relajación del PL del PE de la misma forma.

Luego, sólo se ramifica en una variable (x_1), puesto que si se ramifica en la otra variable (x_2), se estaría violando la restricción; lo expresado anteriormente se muestra en la gráfica 9:



Gráfica 9. Árbol final de ramificación y acotamiento para problemas de programación mixta.

CAPITULO 3

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y METODOLOGÍA DE SOLUCIÓN

3.1 SELECCIÓN TÉCNICA ECONÓMICA DE UNIDADES.

El problema a resolver es el despacho económico del día 7 de marzo del 2010, tomando como dato del CENACE. Para la solución se considera: una cuota hidroeléctrica baja, es decir una época de estiaje, donde la mayoría de las centrales a despacharse son del tipo térmico, la demanda del sistema para el día de estudio, la importación de energía eléctrica del Sistema Nacional Interconectado se ignora, así como las pérdidas por transmisión.

La selección técnica económica de unidades es un problema exclusivamente para el parque generador térmico en barra única, la planificación es a muy corto plazo, por lo tanto, si los intervalos horarios se denotan mediante k la expresión es la siguiente:

$$k = 1, 2, \dots, K \quad 23$$

Donde K es el horizonte de tiempo de 24 horas, el equivalente a un día.

3.1.1 FUNCIÓN OBJETIVO.

La función objetivo a minimizarse es el costo total, que consta de la suma del costo de arranque y los costos operativos de las unidades; dentro de una planificación multi horaria, en donde se controla los arranques y paradas de las centrales térmicas, para la satisfacción de la demanda requerida mientras se cumplen las restricciones globales e individuales de las unidades generadoras que se encuentran dentro del parque generador térmico.

²³ Pág. 39 Enrique Castillo, Antonio J. Conejo, Pablo Pedregal, Ricardo García y Natalia Alguacil, Formulación y Resolución de Modelos de Programación Matemática en Ingeniería y Ciencia.

3.1.1.1 FUNCIÓN COSTO DE ARRANQUE.

De acuerdo a la regulación No. CONELEC 004/00 el costo de arranque – parada de una unidad turbo – vapor, “es aquel en el cual se incurre para poner en operación y ubicar en línea la unidad, luego de que la misma ha permanecido parada, a solicitud del CENACE por más de 48 horas, es decir para un arranque en frío.

En el caso de que la unidad sea puesta en línea antes de las 48 horas, se considerará como un arranque en caliente y no será objeto de remuneración”²⁴.

El cálculo del coste de arranque – parada se expresa en función del porcentaje de la inversión total del equipo que se envejece o afecta por el proceso de arranque – parada, factor de recuperación del capital, la inversión total actualizada y el tiempo de funcionamiento equivalente al arranque-parada.

El factor de recuperación de capital es una expresión exponencial que se encuentra en función del tiempo medio de vida útil y la tasa de descuento.

Los costos de arranque – parada se expresarán en dólares, se consideran valores constantes para cada una de las centrales térmicas y se formula de la siguiente manera:

$$[1] \quad C_j * v_{jk} \quad 25$$

Donde C_j es el costo de arranque de la central j, y v_{jk} es una variable binaria que toma el valor de 1 si la central j está en funcionamiento durante el período k y 0 en otro caso.

3.1.1.2 FUNCIÓN COSTO VARIABLE.

De acuerdo a la regulación No. CONELEC 003/03 el Costo Variable de Producción es aquel necesario para operar y mantener la unidad o planta generadora y que cambia en función de la energía producida, el mismo que se define como la sumatoria de los siguientes costos:

²⁴ <http://www.conelec.gov.ec/normativa>

²⁵ Pág. 39 Enrique Castillo, Antonio J. Conejo, Pablo Pedregal, Ricardo García y Natalia Alguacil, Formulación y Resolución de Modelos de Programación Matemática en Ingeniería y Ciencia.

- *Costos de combustible.*
- *Costos de transporte de combustible.*
- *Costos de lubricantes, productos químicos y otros insumos.*
- *Costo del agua potable.*
- *Costos de Mantenimiento.*
- *Los costos variables de operación y mantenimiento de los equipos e instalaciones destinados al control y mitigación del impacto ambiental, durante el ciclo operativo.*
- *Costo de Energía Eléctrica para servicios auxiliares”²⁶.*

Los valores de los costos variables de cada una de las centrales están declarados como datos para la selección técnica económica de las unidades generadoras y su formulación es la siguiente:

[2]
$$E_j \cdot P_{jk}$$
 ²⁷

Donde E_j es el coste variable de la central j , y P_{jk} es la producción de la central j durante el periodo k .

3.2 RESTRICCIONES GLOBALES E INDIVIDUALES.

Las restricciones son herramientas estratégicas limitantes para largo, corto plazo y muy corto plazo, que por lo general son inecuaciones lineales o no lineales sobre variables continuas.

3.2.1 RESTRICCIONES GLOBALES.

Las restricciones globales son las que sirven para limitar en forma general al sistema (dan robustez al modelo matemático), las mismas son conocidas como restricciones para mantener en operación, y sirven para dar estabilidad de potencia en la generación.

²⁶ <http://www.conelec.gov.ec/normativa>

²⁷ Pág. 40 Enrique Castillo, Antonio J. Conejo, Pablo Pedregal, Ricardo García y Natalia Alguacil, Formulación y Resolución de Modelos de Programación Matemática en Ingeniería y Ciencia.

Para una correcta selección técnica económica de las centrales de generación termoeléctricas dentro de un parque generador térmico se modelan las siguientes restricciones globales.

3.2.1.1 RESTRICCIÓN DE BALANCE DE POTENCIA ACTIVA.

El mantener un balance es tener una igualdad entre una entrada y una salida, en el caso de un sistema eléctrico de potencia es el abastecimiento de la demanda en todo instante. Si no se cumple ésta restricción, produce variaciones en la frecuencia nominal de trabajo causando efectos indeseables en el sistema, por tal motivo es un limitante fundamental dentro de la selección técnica económica de unidades y su formulación es la siguiente:

$$\sum_{j=1}^J P_{jk} = D_k \quad (\forall k) \quad [3]$$

En donde J es el número de centrales, D_k es la demanda de potencia en el instante k , y P_{jk} es la producción de la central j durante el periodo k ; la fórmula planteada se cumple para todo instante k ($\forall k$).

3.2.1.2 RESTRICCIÓN DE RESERVA DE POTENCIA.

La reserva de potencia es una restricción que asegura la respuesta del sistema ante posibles percances en las unidades de generación; puesto que por razones de seguridad del sistema, la potencia total disponible de centrales en funcionamiento debe ser mayor que la demanda en una determinada cantidad de reserva, y se formula de la siguiente manera.

$$\sum_{j=1}^J P_j \cdot v_{jk} \geq D_k + R_k \quad (\forall k) \quad [4]$$

Donde P_j es el límite máximo de potencia de la unidad j , R_k es la potencia de reserva requerida por el sistema en el instante k , D_k es la demanda de potencia en el instante k , y v_{jk} es una variable binaria que toma el valor de 1 si la central j está en funcionamiento durante el período k y 0 en otro caso.

3.2.2 RESTRICCIONES INDIVIDUALES.

Este tipo de restricciones son limitantes individuales de cada una de las unidades generadoras, las cuales no deben ser sobrepasadas para que se cumpla correctamente la selección técnica económica de unidades.

3.2.2.1 LÍMITE DE GENERACIÓN DE POTENCIA ACTIVA.

Se considera solo la potencia activa para poder satisfacer la demanda impuesta, dichos límites se establecen por la cantidad de potencia mecánica que puede entregar la turbina.

Las centrales de generación térmicas no pueden funcionar por debajo de una producción mínima, ni por encima de una producción máxima. Lo cual se formula de la siguiente manera:

$$[5] \quad \underline{P}_j * v_{jk} \leq p_{jk} \leq \bar{P}_j * v_{jk}$$

En donde \underline{P}_j y \bar{P}_j son la potencia activa mínima y máxima de la unidad j respectivamente, p_{jk} es la producción de la central j durante el periodo k y v_{jk} es una variable binaria que toma el valor de 1 si la central j está en funcionamiento durante el período k y 0 en otro caso.

3.2.2.2 TIEMPO MÍNIMO DE SALIDA.

Se considera como tiempo mínimo de salida o fuera de servicio, al mínimo necesario que debe estar la unidad de generación sin funcionamiento luego de haber salido de línea; su representación matemática se indica a continuación.

$$[6] \quad v_{j,k-1} - v_{jk} + v_{j,A} \leq 1$$

$$\forall \left(A = k+1, \dots, \min(k+1, k+T_d-1) \right) \quad 28$$

²⁸ Pág. 23 NCP – MODELO DE PLANIFICACIÓN DE LA OPERACIÓN ENERGÉTICA DE CORTO PLAZO.

Donde:

$v_{j,k-1}$ Es una variable binaria que toma el valor de 1 si la central j está en funcionamiento durante el período $k-1$ y 0 en otro caso.

v_{jk} Es una variable binaria que toma el valor de 1 si la central j está en funcionamiento durante el período k y 0 en otro caso.

$v_{j,A}$ Es una variable binaria que toma el valor de 1 si la central j está en funcionamiento durante el período A y 0 en otro caso.

La formulación es válida para todo intervalo $k = 2$ hasta 24, y para A se toma desde el intervalo siguiente $(k+1)$ hasta el intervalo anterior a k añadido el tiempo mínimo de salida de la planta j $(k + T_d - 1)$.

T_d Es el mínimo tiempo que la planta j debe permanecer fuera de sincronismo.

3.2.2.3 TIEMPO MÍNIMO DE OPERACIÓN.

Se entiende como tiempo mínimo de operación ó de funcionamiento, al mínimo necesario que la unidad de generación debe de estar en servicio una vez que es puesta en línea al sistema.

$$v_{j,k-1} - v_{jk} + v_{j,A} \geq 0$$

[7] $\forall \left(\begin{matrix} k=2 \dots K \\ A=k+1 \dots \min(K+1, k+T_d-1) \end{matrix} \right)$ 29

Donde:

$v_{j,k-1}$ Es una variable binaria que toma el valor de 1 si la central j está en funcionamiento durante el período $k-1$ y 0 en otro caso.

v_{jk} Es una variable binaria que toma el valor de 1 si la central j está en funcionamiento durante el período k y 0 en otro caso.

²⁹ Pág. 23 NCP – MODELO DE PLANIFICACIÓN DE LA OPERACIÓN ENERGÉTICA DE CORTO PLAZO.

$v_{j,A}$ Es una variable binaria que toma el valor de 1 si la central j está en funcionamiento durante el período A y 0 en otro caso.

La formulación es válida para todo intervalo $k = 2$ hasta 24, y para A se toma desde el intervalo siguiente $(k+1)$ hasta el intervalo anterior a k añadido el tiempo mínimo de operación de la planta j $(k + T_{\min} - 1)$.

- Es el mínimo tiempo que la planta j debe permanecer en línea.

3.2.2.4 VARIACIÓN DE TOMA DE CARGA.

La variación de toma de carga se la conoce como máxima rampa de subida y bajada, la misma que se define como la variación de potencia generada por una planta entre dos instantes de tiempo consecutivos.

La velocidad de toma de carga de una unidad generadora depende del tipo de turbina al cual este acoplado el generador y tiene su limitación.

RAMPA MÁXIMA DE SUBIDA DE CARGA.

Cualquier central térmica no puede acrecentar su producción por encima de un máximo, al pasar de un periodo de tiempo al siguiente. Esta restricción tiene la siguiente expresión:

$$[8] \quad p_{j,k+1} - p_{jk} \leq S_j \quad 30$$

Donde S_j es la rampa máxima de subida de carga de la central j , p_{jk} es la producción de la central j durante el periodo k y $p_{j,k+1}$ es la producción de la central j durante el periodo siguiente $(k+1)$. Esta restricción es válida para todas las centrales j y para el intervalo de

RAMPA MÁXIMA DE BAJADA DE CARGA.

Cualquier central térmica no puede bajar su producción por encima de un máximo, al pasar de un periodo de tiempo al siguiente. Esta restricción tiene la siguiente expresión:

³⁰ Pág. 40 Enrique Castillo, Antonio J. Conejo, Pablo Pedregal, Ricardo García y Natalia Alguacil, Formulación y Resolución de Modelos de Programación Matemática en Ingeniería y Ciencia.

$$[9] \quad p_{jk} - p_{j,k+1} \leq T_j \quad 31$$

Donde T_j es la rampa máxima de bajada de la central j y p_{jk} es la producción de la central j durante el periodo k .

3.2.2.5 TIEMPO MÁXIMO DE OPERACIÓN.

La restricción representa el tiempo máximo en horas que una central de generación térmica puede permanecer en operación o sincronizada una vez que entre en línea en cualquier instante de tiempo, y se la representa de la siguiente manera.

$$[10] \quad \sum_{k=0}^{\min(T-R, Tmu(j)+1)} v_{j,k+1} \leq Tmu(j) \quad \forall j = 1 \dots K$$

Donde $Tmu(j)$ es el máximo tiempo que la planta j puede permanecer en línea.

3.2.2.6 DISPONIBILIDAD DE COMBUSTIBLE.

Es la limitación de cantidad de combustible en la selección de unidades de generación, que es directamente proporcional a la potencia que despachan las centrales termoeléctricas en un período de corto plazo e inversamente proporcional al rendimiento de cada una de ellas.

$$[11] \quad \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J \frac{p_{jk}}{rend_j} \leq \theta_{comb} \quad \forall \theta_{comb} \in \text{combustible diesel}$$

Donde $rend_j$ es el rendimiento de la unidad j en MWh/galón, p_{jk} es la producción de la central j durante el periodo k , y θ_{comb} es la disponibilidad de combustible en galones.

La disponibilidad de combustible tiene dos rangos que son máximos y mínimos, para su cálculo se da la siguiente formulación:

³¹ Pág. 40 Enrique Castillo, Antonio J. Conejo, Pablo Pedregal, Ricardo García y Natalia Alguacil, Formulación y Resolución de Modelos de Programación Matemática en Ingeniería y Ciencia.

[12]

$$\theta_{comb} = \begin{cases} \theta_{MAX} = \sum_{j=1}^J \frac{P_{jMAX} * MUT}{rend_j} \\ \theta_{MIN} = \sum_{j=1}^J \frac{P_{jMIN} * MUT}{rend_j} \end{cases} \quad \forall j \in combustible \text{ diesel}$$

Donde MUT es el tiempo mínimo de operación de las centrales termoeléctricas, θ_{MAX} es la disponibilidad máxima y θ_{MIN} es la disponibilidad mínima.

3.2.2.7 CUOTA ENERGÉTICA HIDRÁULICA.

Las principales centrales hidroeléctricas son las de Paute y Pucará, las cuales son tomadas como base de generación, por lo tanto conforman la cuota energética para el caso de estudio y se representa de la siguiente manera.

[13]

$$\sum_k^T p_{jk} \leq \theta_j \text{ cuota}$$

Donde $\theta_j \text{ cuota}$ es la cuota energética de la unidad j y p_{jk} es la potencia de la unidad j en el período k.

Al momento de insertar esta restricción, se toma las siguientes consideraciones para estas dos plantas hidroeléctricas:

- Se modela la potencia mínima a ser despachada de cada una respectivamente de las centrales hidráulicas, pero sin ser consideradas dentro de la selección técnica económica de unidades, lo que quiere decir, que no dependen de la variable binaria de decisión.

$$P_{jk} \geq P_j \quad \forall j \in \text{hidraulicas}$$

La potencia máxima de la central Pucara es manejada de forma similar que la potencia mínima descrita anteriormente, lo cual se representa de la siguiente manera:

$$P_{jk} \leq \bar{P}_j \quad \forall k, j = Pucara$$

La potencia máxima de Paute varia durante los 24 períodos de tiempo en función de la reserva secundaria de frecuencia.

$$P_{jk} \leq \bar{P}_{jk} \quad \forall k, j = Paute$$

Donde \bar{P}_{jk} que es la producción de la central de Paute en el período k, y se calcula de la siguiente forma:

$$\bar{P}_{jk} = Pot_{instalada} - (4\% Demanda_k)$$

Donde $Pot_{instalada}$ es la potencia instalada de la central Paute, mientras que la $Demanda_k$ es la demanda horaria del sistema.

3.2.2.8 RESTRICCIÓN DE EMISIÓN DE DIÓXIDO DE CARBONO.

La industria de generación térmica contribuye fuertemente a la contaminación del medio ambiente, la misma que tiene una relación directamente proporcional con la producción de energía eléctrica; por tal motivo, la restricción ambiental representa los límites en la emisión de gases contaminantes de una central termoeléctrica hacia el exterior, la formulación matemática es la siguiente.

$$\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J \tau * P_{jk} \leq Em_j$$

[14]

Donde τ es el coeficiente de emisiones de CO₂ (ton CO₂/MWh), Em_j es el límite total de emisión de gases permisibles y P_{jk} es la potencia de la unidad j.

Los coeficientes de emisión de CO₂ no son estandarizados y para su determinación existen dos métodos; el primero se denomina de referencia, el cual depende del contenido de carbono de acuerdo a la quema de un determinado combustible, y del año de estimación; el segundo método es el de tecnologías de diferentes contaminantes, depende del uso que se le da al energético y del año de estimación.

Los coeficientes de emisión de CO₂ para el diesel, fuel-Oíl, y el gas natural son tomados de acuerdo al método de tecnologías y los datos se encuentran en la tabla No 12 de la guía SIEN M-5, mientras que para el residuo se usa el método de referencia que se detalla en la guía SIEN M-3; a continuación se detallan los valores de los coeficientes de emisión de dióxido de carbono.

TIPO DE COMBUSTIBLE	COEFICIENTE DE CO ₂ (Ton CO ₂ /MWh)
RESIDUO	0.274371
FUEL-OÍL	0.266743
DIESEL	0.251687
GAS NATURAL	0.178735

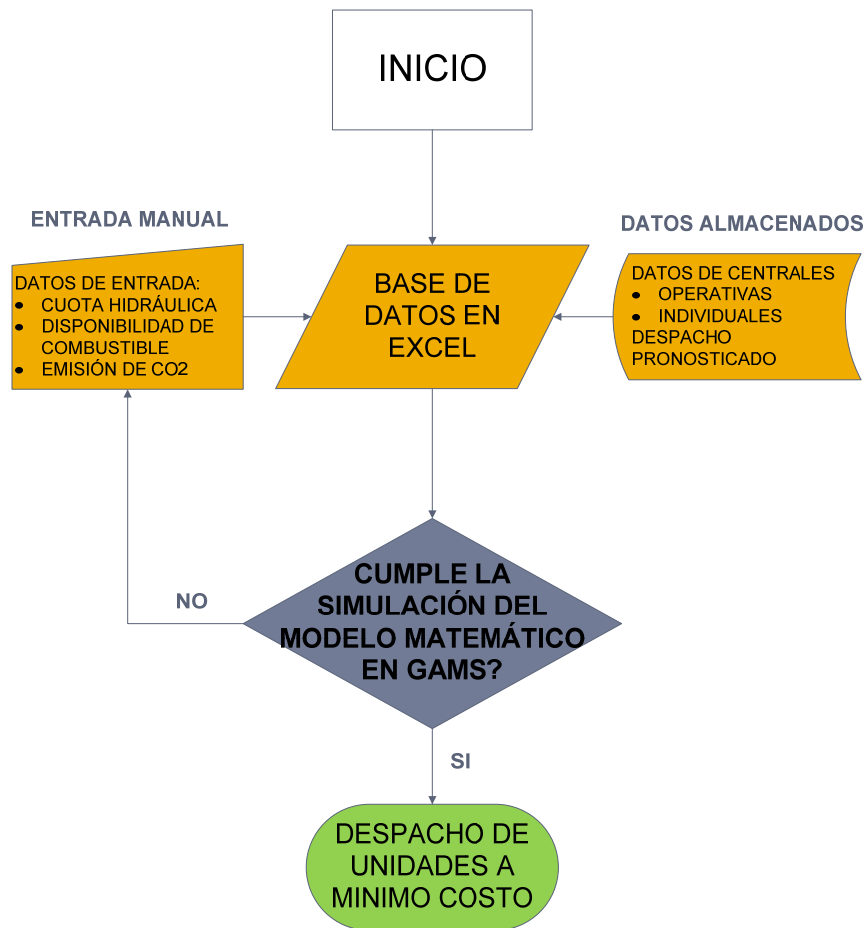
Tabla 1. Coeficientes de emisión de CO₂

3.3 MÉTODO DE SELECCIÓN TÉCNICA ECONÓMICA DE UNIDADES DE GENERACIÓN TERMOELÉCTRICAS.

Para una selección de manera técnica y económica de las unidades de generación que se encuentran dentro de un parque generador térmico, se deben minimizar el costo total que es la suma de los costos de arranque y los costos variables.

Se considera que cada una de las centrales tiene diferentes especificaciones de carácter operativo e individual; además, se establece la disponibilidad de combustible como dato de entrada, puesto que con ello se puede restringir a las unidades térmicas, obligando al parque generador térmico a despachar otro tipo de unidades; la cuota hidráulica es otro dato de entrada, con la variación de la misma se forma un escenario de estiaje; y la emisión de dióxido de carbono es otro valor de ingreso, puesto que acota la emanación de CO₂ en la selección técnica económica de unidades termoeléctricas.

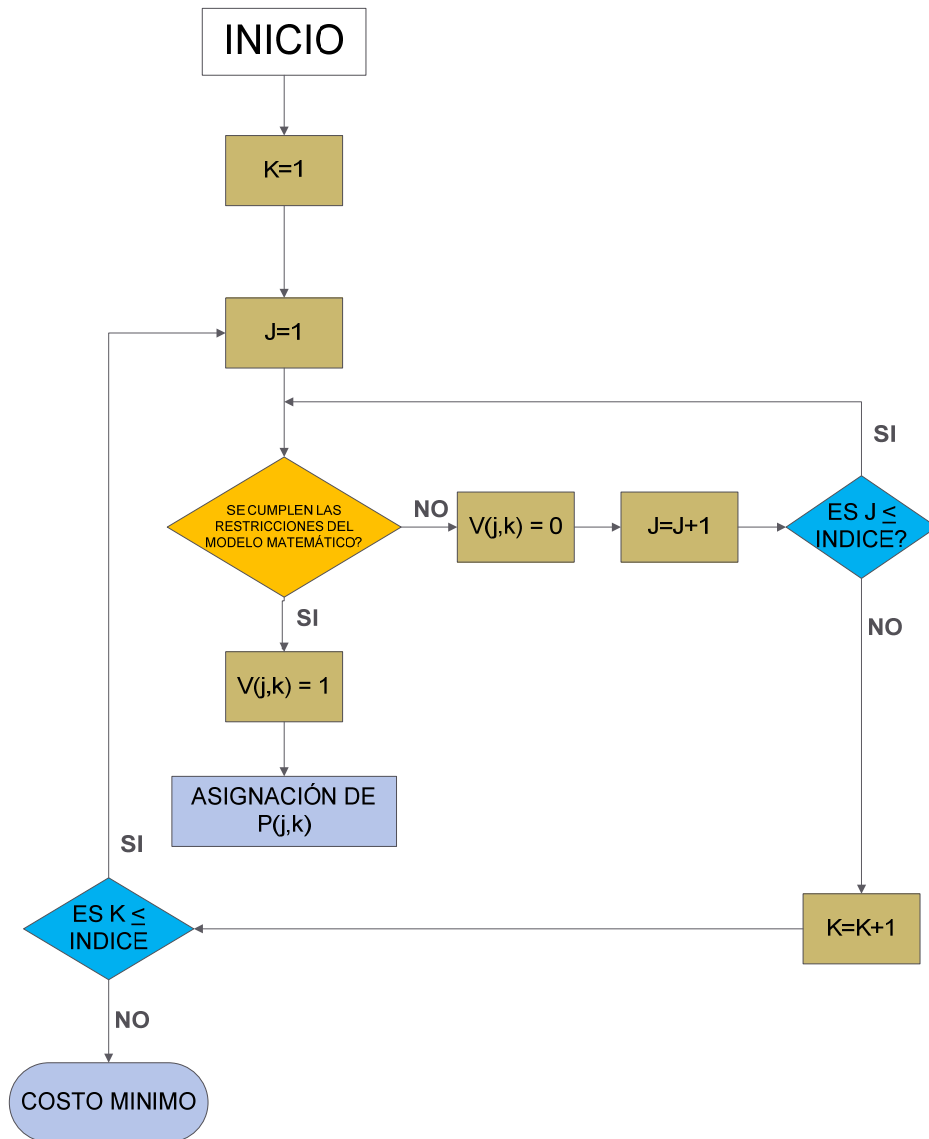
La metodología a seguir para la selección técnica económica de unidades es mediante un simulador matemático (GAMS), donde se encuentran las restricciones globales e individuales de las centrales térmicas; los datos de las unidades generadoras y el despacho pronosticado para el estudio se encuentran en una base de datos hecha en EXCEL; el modelo matemático toma los datos asignados para el estudio, y resuelve el problema de selección de unidades mediante programación lineal entera mixta, minimizando el costo total de operación del sistema y cumpliendo con todas las restricciones (en el ANEXO 1 se indica la forma de uso de la macro desarrollada para la solución del U.C.); en la gráfica 10 se muestra el flujo que cumple el U.C. planteado.



Gráfica 10. Diagrama de flujo de la selección técnica económica de unidades termoeléctricas.

El simulador matemático (GAMS) se alimenta de la base de datos; y el cumplimiento de todas las restricciones de operación e individuales lleva a un despacho de unidades térmicas a un costo mínimo, caso contrario se debe modificar los datos de entrada manual (cuota hidráulica, disponibilidad de combustible y emisión de CO₂) para un nuevo ingreso al simulador.

El solver que utiliza GAMS resuelve el problema mediante interacciones, asignando el valor de potencia de cada central en el intervalo de tiempo $P(j,k)$ y la acopla a las centrales termoeléctricas mediante una variable binaria de decisión $V(j,k)$, realizando un barrido de todas las unidades generadoras y verificando el cumplimiento de las restricciones impuestas, en la gráfica 11 se indica el flujo que cumple el programa utilizado para la solución del U.C.



Gráfica 11. Diagrama de flujo del simulador matemático GAMS.

En GAMS inicialmente se declaran los conjuntos, donde K es el índice de tiempo en horas, J es el índice de centrales que se encuentran en la base de datos; luego se llama a los datos de centrales y el despacho pronosticado en forma de tablas; seguidamente se declaran las variables de salida como es el costo total del U.C. (función objetivo); a continuación se asignan valores iniciales de potencia y acoplamiento de las centrales que se encuentran en la base de datos; luego se encuentran las restricciones del problema (modelo matemático) y finalmente se declara la solución mediante programación lineal entera mixta minimizando la función objetivo.

3.4 MÉTODO MATEMÁTICO.

La forma de plantear el problema a resolver tiene una estructura compuesta por dos cuerpos los cuales son: la función objetivo o función de minimización y las restricciones a las cuales se encuentra sometido el problema; su representación se muestra de manera siguiente:

Función objetivo:

$$\text{Min } z = \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J [B_j * p_{jk} + C_j * v_{jk}]$$

Sujeto a:

Restricción de balance de potencia activa.

$$\sum_{j=1}^J p_{jk} = D_k \quad (\forall k)$$

Restricción de reserva de potencia.

$$\sum_{j=1}^J P_j * v_{jk} \geq D_k + R_k \quad (\forall k)$$

Límite de generación de potencia activa.

$$\underline{P}_j * v_{jk} \leq p_{jk} \leq \bar{P}_j * v_{jk}$$

Tiempo mínimo de salida.

$$v_{jk-1} - v_{jk} + v_{jA} \leq 1$$

$$\forall \left(\begin{array}{l} k = 2 \dots K \\ A = k + 1 \dots \min(K + 1, k + T_d - 1) \end{array} \right)$$

Tiempo mínimo de operación.

$$v_{jk-1} - v_{jk} + v_{jA} \geq 0$$

$$\forall \left(\begin{array}{l} k = 2 \dots K \\ A = k + 1 \dots \min(K + 1, k + T_u - 1) \end{array} \right)$$

Rampa máxima de subida de carga.

$$p_{j,k+1} - p_{jk} \leq S_j$$

Rampa máxima de bajada de carga.

$$P_{jk} - P_{j,k+1} \leq T_j$$

Tiempo máximo de operación.

$$\sum_{k=0}^{min(F-K,Tmu(j)+1)} v_{j,k+A} \leq Tmu(j) \quad \forall k = 2 \dots K$$

Disponibilidad de combustible.

$$\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J \frac{P_{jk}}{\tau_{and,j}} \leq \theta_{comb}$$

Cuota energética hidráulica.

$$\sum_k P_{jk} \leq \sigma_{j,quot.}$$

$$P_{jk} \geq P_j \quad \forall j \in \text{hidraulicas}$$

$$P_{jk} \leq \bar{P}_j \quad \forall k, j = Pucara$$

$$P_{jk} \leq \bar{P}_{jk} \quad \forall k, j = Paute$$

Restricción de emisión de dióxido de carbono.

$$\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J \tau^* P_{jk} \leq Em_j$$

Los principales componentes del problema propuesto son:

DATOS:

K	Horizonte de tiempo, igual a 24 horas.
C_j	Costo de arranque en \$ de la central j .
B_j	Costo variable en \$/MWh de la central j .
J	Número de centrales del sistema.
D_k	Demanda de potencia en el instante k .
\bar{P}_j	Límite máximo de potencia de la unidad j .
R_k	Potencia de reserva requerida por el sistema en el instante k .
\underline{P}_j	Límite mínimo de potencia de la unidad j .
T_d	Mínimo tiempo que la planta j debe permanecer fuera de línea.
T_u	Mínimo tiempo que la planta j debe permanecer en línea.
S_j	Rampa máxima de subida de carga de la central j .
T_j	Rampa máxima de bajada de carga de la central j .
$Tmu(j)$	Máximo tiempo que la planta j puede permanecer en línea.
\mathcal{Q}_{comb}	Disponibilidad de combustible.
$rend_j$	Rendimiento de la unidad j en MWh/galón.
q_j^{energ}	Cuota energética de la unidad j .
τ	Coeficiente de emisiones de CO2 (ton CO2/MWh).
Em_j	Límite total de emisión de gases permisibles.
p_j	Potencia de la unidad j .
T	Horizonte de tiempo, igual a 25 horas (período K más el período del despacho inicial)

VARIABLES:

V_{jk}	Variable binaria (1 si la central j está en funcionamiento durante el período k y 0 en otro caso).
V_{jk-1}	Variable binaria que toma el valor de 1 si la central j está en funcionamiento durante el período anterior ($k-1$) y 0 en otro caso.
V_{jA}	Variable binaria que toma el valor de 1 si la central j está en funcionamiento durante el período A y 0 en otro caso.
P_{jk}	Producción en MW de la central j en el período k.

CAPITULO 4

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

4.1 INTRODUCCIÓN:

La selección técnica económica de unidades generadoras termoeléctricas se realiza en función de las centrales térmicas que se encuentran en la base de datos y del aporte hidroeléctrico que se usa por políticas de operación para el sistema.

Dentro de la base de datos existen dos principales centrales hidroeléctricas que son: Paute y Pucará; mientras que las centrales térmicas se encuentran especificadas de acuerdo al tipo de combustible que utilizan para la generación de energía eléctrica, clasificándose en cuatro grupos que son: centrales termoeléctricas a Fuel-oil con un total de 11 de ellas, centrales termoeléctricas a Residuo en total 19 de ellas, centrales termoeléctricas a Diesel en total 47 de ellas y las centrales a gas natural con un total de 2 de ellas. Por lo tanto se cuenta con 79 centrales de generación térmicas y 2 centrales de generación hidráulicas.

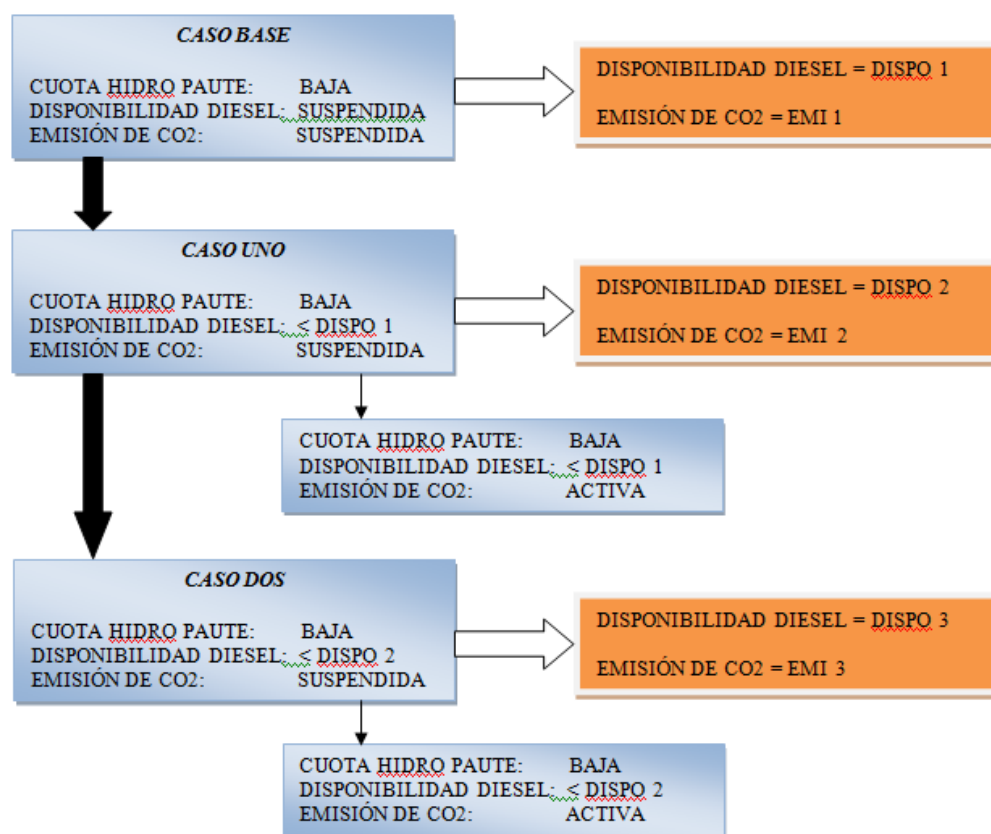
El estudio a realizar considera una época de estiaje, por lo tanto se tiene una cuota hidroeléctrica por parte de la central de Paute baja, y se realiza un despacho de centrales de manera tradicional, esto quiere decir que no se considera la restricción de disponibilidad de combustible y tampoco se considera la restricción de emisión de dióxido de carbono, de allí es donde nace el caso base.

Para el caso uno se usa como dato la cantidad de combustible diesel que se obtuvo de la selección de unidades del caso base; activando la restricción de disponibilidad de combustible diesel con un valor menor al obtenido en el caso base, y luego se realiza la selección de unidades nuevamente y se obtiene un valor de emisión de dióxido de carbono, con éste valor se activa la restricción de emisión de dióxido de carbono y se vuelve a realizar la selección de unidades.

Para el caso dos se usa como dato la cantidad de combustible diesel que se obtuvo de la selección de unidades del caso uno; activando la restricción de disponibilidad de

combustible diesel con un valor menor al obtenido en el caso uno, y luego se realiza la selección de unidades nuevamente y se obtiene un valor de emisión de dióxido de carbono, con éste valor se activa la restricción de emisión de dióxido de carbono y se vuelve a realizar la selección de unidades.

La selección de casos de estudio se la hace de acuerdo a los resultados que se obtiene del optimizador GAMS, en la siguiente gráfica se indica la manera de escoger cada uno de los caso.



Gráfica 12. Selección de casos de estudio.

Para el análisis de sensibilidad se toma en cuenta tres variables; la primera es la disponibilidad de combustible diesel la cual hace que el sistema empiece a despachar otro tipo de centrales térmicas más contaminantes, la segunda variable es la cuota hidroeléctrica de la central Paute, con la que se simula un escenario de estiaje y por lo tanto hace

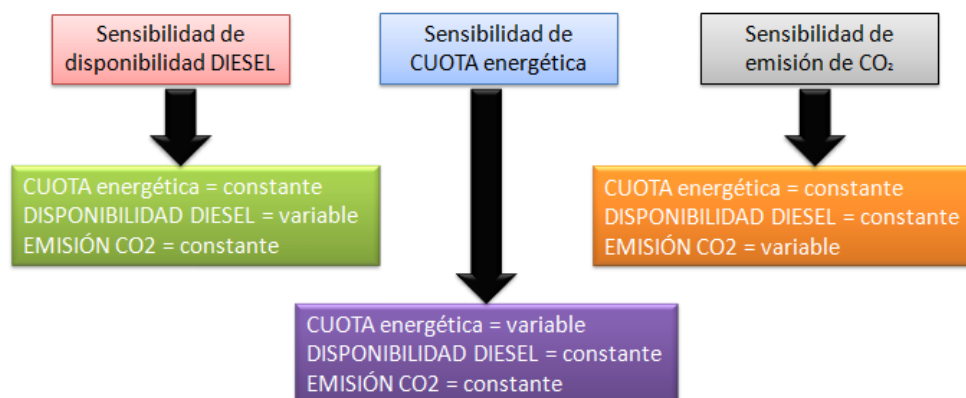
despachar más centrales térmicas; y la tercera variable es la emisión de dióxido de carbono, con lo que se controla las expulsiones totales de CO₂.

Manteniendo una cuota hidroeléctrica de la central Paute en su valor medio y constante, mientras se hace variar la disponibilidad de combustible diesel desde un valor alto hasta un valor mínimo se obtienen los puntos para realizar el análisis de sensibilidad ante la disponibilidad de combustible.

En el siguiente estudio se mantiene una disponibilidad de combustible diesel alta y constante, mientras se hace variar la cuota hidroeléctrica desde su valor mínimo hasta un valor alto, y en cada uno de los pasos se obtiene los puntos del análisis de sensibilidad ante la cuota hidroeléctrica.

Y para el último estudio se mantiene la cuota para una época seca y la disponibilidad de combustible del caso base, mientras se reducen las emanaciones de dióxido de carbono hasta su valor mínimo.

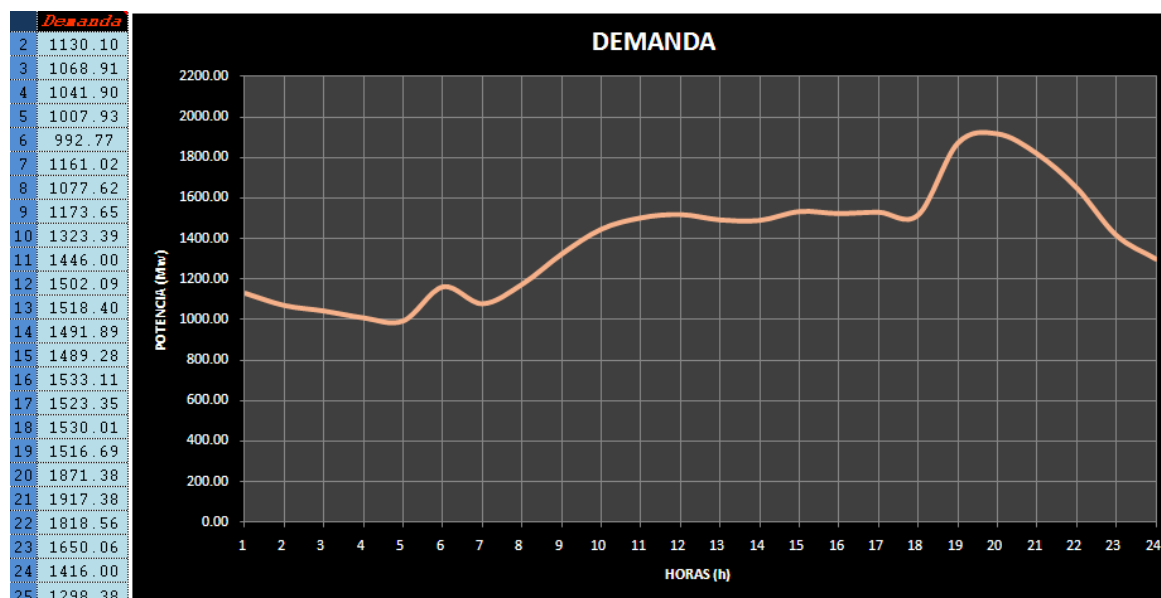
Para los tres análisis de sensibilidad, se realizan las curvas correspondientes al costo total de la selección de unidades en función de la emisión de dióxido de carbono total; a continuación se presenta una gráfica en donde se puede apreciar los estudios de sensibilidad tomados.



Gráfica 13. Casos para el análisis de sensibilidad.

4.2 CASO BASE: CUOTA HIDRÁULICA BAJA.

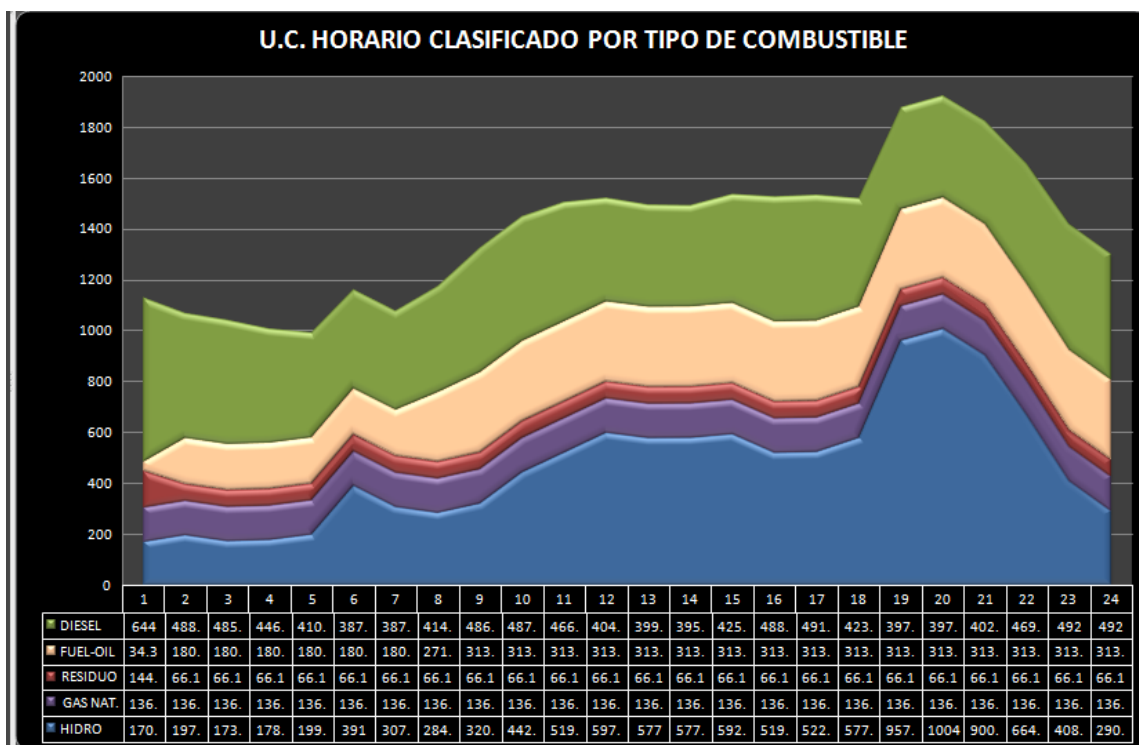
El caso base a desarrollar considera el problema de selección de unidades con indisponibilidades de ciertas centrales térmicas del sistema nacional interconectado. La demanda pronosticada toma en cuenta las pérdidas y los consumos internos, se mantiene una cuota energética establecida por políticas de operación para las centrales hidráulicas de Paute y Pucará, la restricción de combustible se considera relajada y la restricción de emisión de dióxido de carbono es suspendida de la modelación; para la solución del problema de selección de unidades no se incluyó la entrega de energía a través de las interconexiones internacionales de electricidad ni tampoco la generación hidráulica de las demás centrales hidroeléctricas, la demanda tomada en consideración se presenta en la siguiente gráfica.



Gráfica 14. Curva de demanda para la selección técnica económica de unidades de generación térmicas.

En éste caso, se consideran como datos de entrada: la cuota energética resultante de la regulación del embalse Amaluza a través de la central de Mazar y de la disponibilidad efectiva de energía de la central hidráulica Paute, dicho valor corresponde a 10500 MWh (dato tomado del CENACE del día 7 de marzo del 2010 considerado como época de estiaje), mientras que la cuota de la central hidráulica Pucará es de 910 MWh.

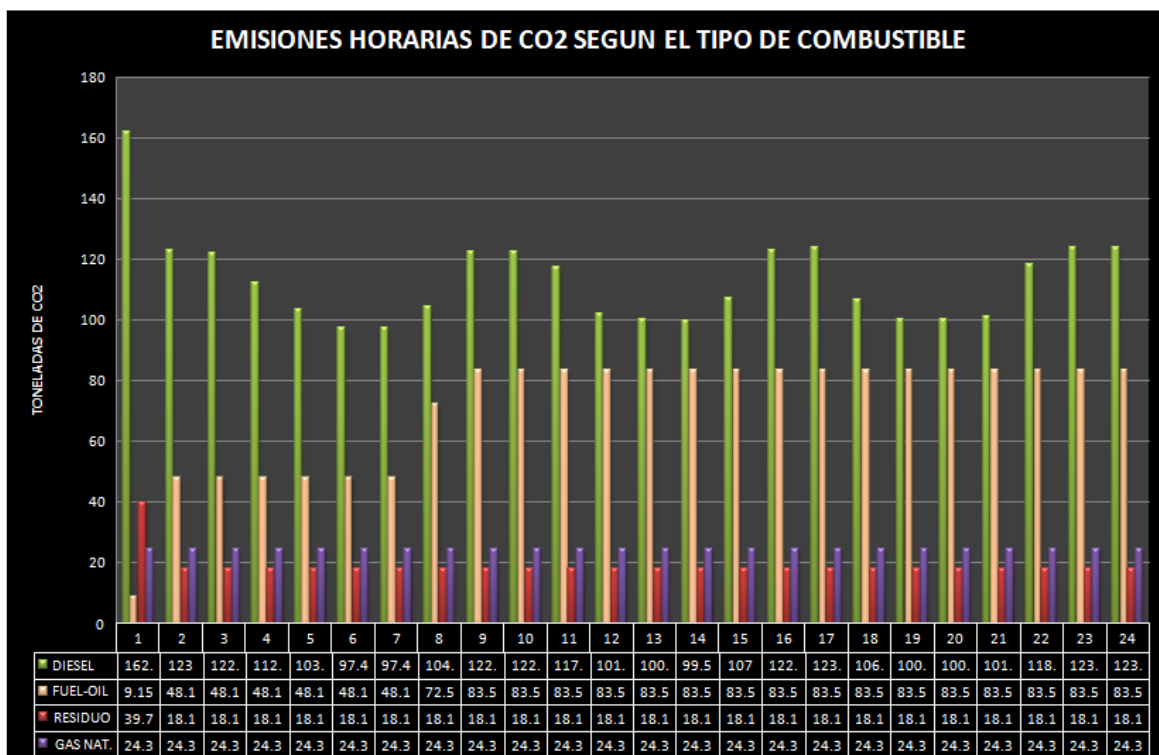
Con éstos datos se realiza la selección técnica económica de unidades de generación y se obtiene el despacho horario de las unidades inmiscuidas en el problema, clasificando las unidades generadoras de acuerdo al tipo de combustible se obtiene la siguiente gráfica.



Gráfica 15. Selección técnica económica de unidades de generación térmicas de acuerdo al tipo de combustible, Caso Base.

En la selección técnica económica de unidades, se aprecia el despacho de las unidades generadoras empezando por las centrales hidroeléctricas en la parte inferior seguido de las centrales térmicas en la parte superior; las centrales hidráulicas y las centrales térmicas de gas natural son las que dan la máxima producción de energía al sistema puesto que son las más baratas y menos contaminantes, luego siguen las centrales a residuo, fuel-oíl y por último las centrales térmicas a diesel.

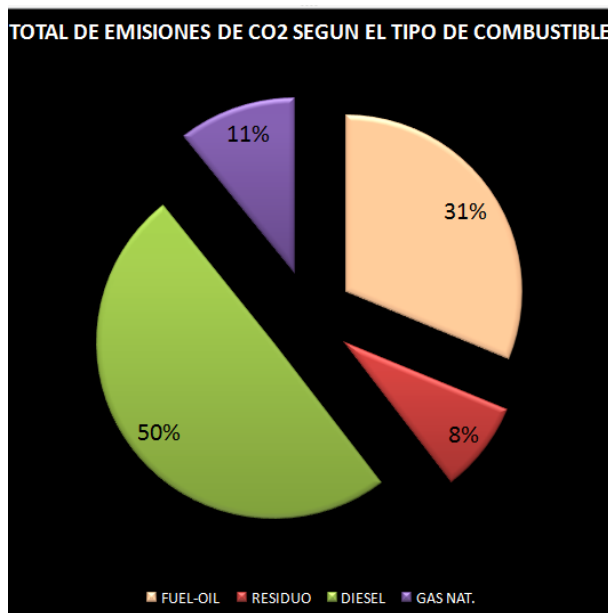
La emisión de dióxido de carbono depende de la potencia que consume el sistema por hora, el tipo de combustible usado para la generación termoeléctrica y su coeficiente emisión de CO₂; en la siguiente gráfica se presenta las emisiones de CO₂ horarias para el caso base.



Gráfica 16. Emisiones de CO2 horarias por tipo de combustible, Caso Base.

En la gráfica 16 se puede ver que la mayor cantidad de emanación de gas contaminante proviene de las centrales termoeléctricas a diesel y fuel-oíl, puesto que son las que mayor potencia horaria despachan, seguidas de las centrales termoeléctricas a residuo, y por último las centrales termoeléctricas a gas natural también aportan en menor grado con la emisión de dióxido de carbono.

A continuación se visualiza la contribución total de emisiones de CO₂ de acuerdo al tipo de combustible para el caso base.



Gráfica 17. Porcentaje de emisiones de CO2 totales, Caso Base.

En la gráfica 17 se aprecia en porcentaje el total de emisión de dióxido de carbono, en la cual se observa claramente el orden de las centrales de acuerdo a su grado de contaminación, empezando por las de diesel, luego las de fuel-oíl, seguidas por las de residuo y por último las de gas natural; los valores referidos de la gráfica 17 son los resultados obtenidos de la suma de las emisiones horarias clasificadas por el tipo de combustible y se presentan en la siguiente tabla:

TIPO DE COMBUSTIBLE	TOTAL DE EMISIONES EN TON. CO ₂
DIESEL	2714
FUEL-OÍL	1707
RESIDUO	456
GAS NATURAL	585
EMISIÓN TOTAL DE CO₂	5463

Tabla 2. Total de emisiones de CO₂ por tipo de combustible, Caso Base

En la gráfica 18 se muestran los datos de salida para el caso base, los mismos que son resultado de la selección técnica económica efectuado por GAMS, donde se encuentra el tipo de solver usado, el costo total que resulta del despacho realizado, el total de emanación

de dióxido de carbono que se produce, la cuota hidráulica total que consume el sistema, y el consumo total de combustible DIESEL requerido para el U. C.

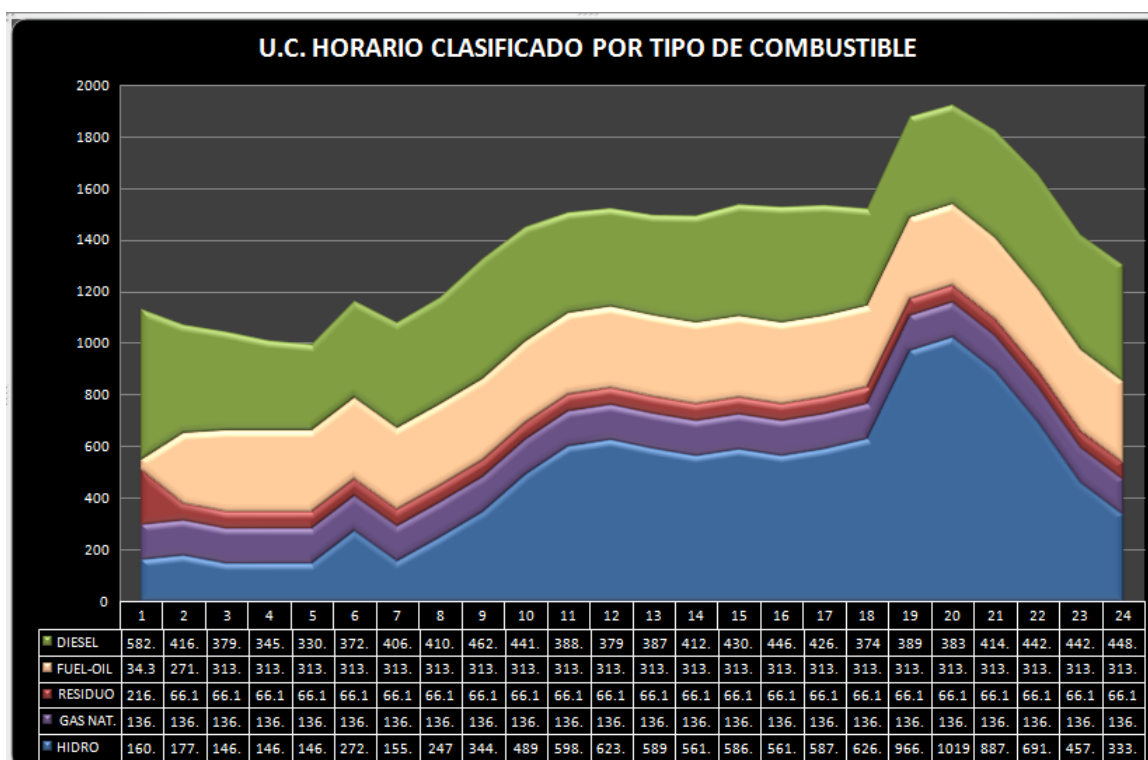
The screenshot displays the SEL-TEC software interface, which is organized into several functional panels. At the top right, the header identifies the institution as 'UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA', the faculty as 'FACULTAD DE INGENIERÍAS', and the program as 'CARRERA ELÉCTRICA'. The main title 'SEL-TEC' is prominently displayed in large yellow letters. On the left side, the 'DATOS DE INGRESO' (Input Data) panel contains three input fields: 'CUOTA HIDRAULICA' with a value of 10500, 'DISPONIBILIDAD DIESEL', and 'EMISION CO2'. Each field is accompanied by up and down arrow buttons for adjustment. Below these fields is a 'CARGAR DATOS' (Load Data) button. The central 'GAMS' panel provides a summary of the solver's status, including the solver type (CPLEX), the number of equations (23391) and variables (4054), the total cost (\$2274787), CO2 emissions (5464 tons), total quota (11376 MW), and diesel availability (987546 Gal). A large 'APLICAR SOLVER' (Apply Solver) button is located at the bottom of this panel. On the right side, the 'GRAFICAS' (Graphics) panel offers four output options: 'SOLUCION' (Solution), 'DESPACHO' (Dispatch), 'EMISIONES' (Emissions), and '% DE EMISIONES' (% of Emissions), each represented by a green button.

Gráfica 18. Pantalla de ingreso y salida de la selección técnica económica de unidades termoelectricas, Caso Base.

4.3 CASO UNO: CUOTA HIDRÁULICA BAJA Y DISPONIBILIDAD DE COMBUSTIBLE DIESEL.

El caso uno guarda la misma organización que el caso base, considerando la misma cuota energética hidráulica establecida por políticas de operación para la central hidráulica Paute y para la central de Pucará, también se activa la restricción de disponibilidad de combustible diesel con un valor de 980000 Galones y la restricción de emisión de dióxido de carbono se encuentra suspendida de la modelación.

Con éstos datos se realiza la selección técnica económica de unidades de generación y se obtiene el despacho horario de las unidades inmiscuidas en el problema, clasificándolas de acuerdo al tipo de combustible aprecia la siguiente gráfica.

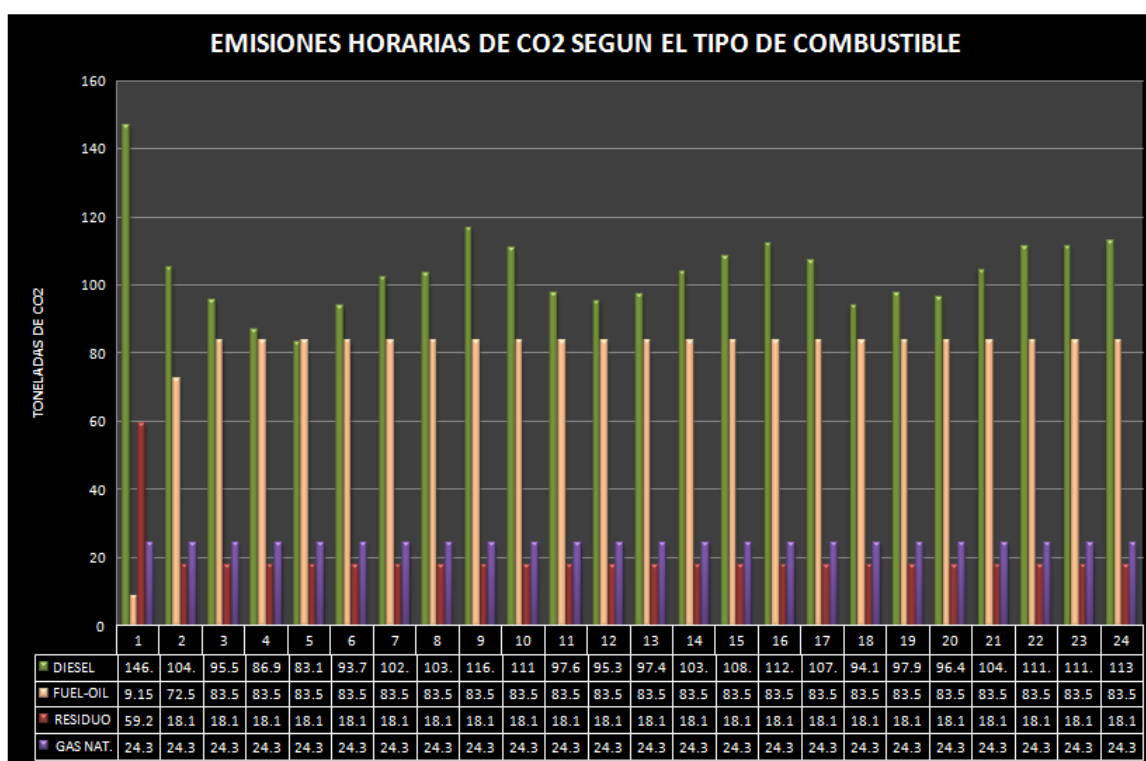


Gráfica 19. Selección técnica económica de unidades de generación térmicas de acuerdo al tipo de combustible, Caso Uno sin restricción de emisión de dióxido de carbono.

Las centrales hidráulicas y las centrales térmicas de gas natural son las que aportan con la máxima producción de energía al sistema puesto que son las más baratas y menos

contaminantes. Existe un incremento de potencia producida por parte de las unidades térmicas a fuel-oíl y residuo, mientras que decrece la potencia de unidades a diesel despachadas con respecto al caso base, esto se debe a que la disponibilidad de combustible diesel se reduce; sin embargo las centrales térmicas a diesel son las que aportan en mayor parte con la producción de energía, puesto que existe gran cantidad de éste tipo de centrales.

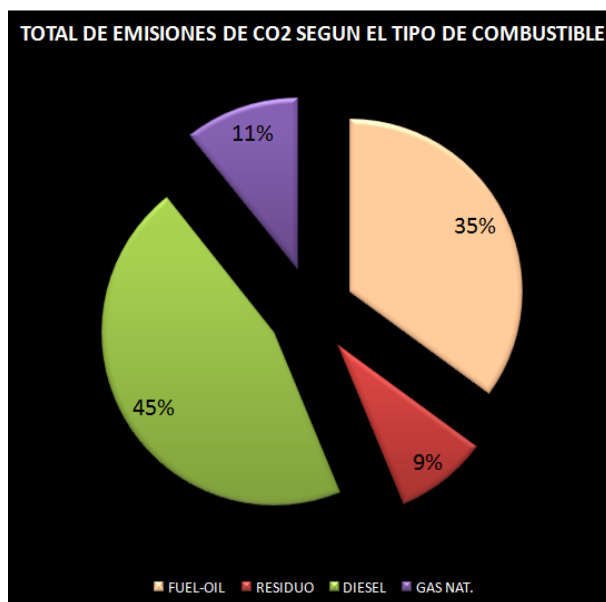
Para la selección técnica económica de unidades generadoras térmicas del caso uno, se consiguen las siguientes emisiones de CO₂ horarias las cuales se muestran en la siguiente gráfica:



Gráfica 20. Emisiones de CO₂ horarias por tipo de combustible, Caso Uno sin restricción de emisión de dióxido de carbono.

El caso uno presenta un incremento en la cantidad de emanación de gas contaminante proveniente de las centrales termoeléctricas a fuel-oíl con respecto al caso base, puesto que es la que incrementa la potencia horaria despachada al restringir al sistema de combustible diesel, por lo tanto la emanación total de dióxido de carbono del sistema incrementa.

En la gráfica 21 se visualiza la contribución total de emisiones de dióxido de carbono de acuerdo al tipo de combustible para el caso uno sin ser tomada en cuenta la restricción de CO₂.



Gráfica 21. Porcentaje de emisiones de CO₂ totales, Caso Uno sin restricción de emisión de dióxido de carbono.

Se puede apreciar que la emisión de CO₂ baja para las centrales termoeléctricas a diesel, esto se debe a la limitación de disponibilidad de diesel puesto que existe en el escenario un bajo abastecimiento de combustible por parte de PETROECUADOR; cabe notar que las centrales termoeléctricas a gas natural mantienen el mismo valor de emisión de CO₂, los valores referidos de la gráfica 21 son los resultados obtenidos de la suma de las emisiones horarias clasificadas por el tipo de combustible y se presentan en la siguiente tabla:

TIPO DE COMBUSTIBLE	TOTAL DE EMISIONES EN TON. CO ₂
DIESEL	2495
FUEL-OÍL	1920
RESIDUO	476
GAS NATURAL	585
EMISIÓN TOTAL DE CO₂	5477

Tabla 3. Total de emisiones de CO₂ por tipo de combustible, Caso Uno sin restricción de emisión de dióxido de carbono.

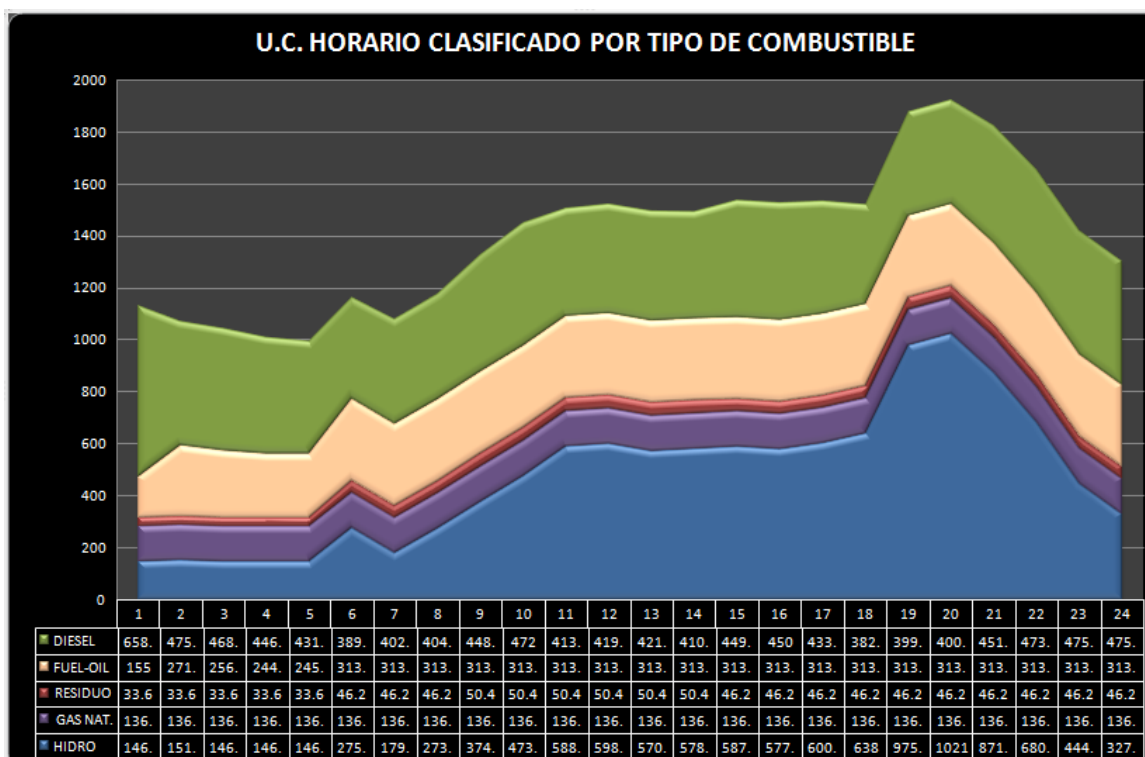
En la gráfica 22 se muestran los datos de salida para el caso uno, los mismos que son resultado de la selección técnica económica efectuado por GAMS, donde se encuentra el tipo de solver usado, el costo total que resulta del despacho realizado, el total de emanación de dióxido de carbono que se produce, la cuota hidráulica total que consume el sistema, y el consumo total de combustible DIESEL requerido para el U. C.

The screenshot displays the SEL-TEC software interface, which is divided into several sections:

- UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**
FACULTAD DE INGENIERÍAS
CARRERA ELÉCTRICA
- SEL-TEC** (Large yellow text)
- DATOS DE INGRESO** (Left sidebar):
 - CUOTA HIDRAULICA**: 10500 (with up/down arrows)
 - DISPONIBILIDAD DIESEL**: 980000 (with up/down arrows)
 - EMISION CO2**: (empty field with up/down arrows)
 - CARGAR DATOS** (button)
- GAMS** (Center):
 - Solver: CPLEX
 - Ecuaciones: 23392 Variables: 4054
 - Costo Total(\$): 2327953
 - Emissiones de CO2(Ton): 5477
 - Cuota Total(MW): 11376
 - Disponibilidad DIESEL(Gal): 899331
 - APLICAR SOLVER** (button)
- GRAFICAS** (Right sidebar):
 - SOLUCION** (button)
 - DESPACHO** (button)
 - EMISIONES** (button)
 - % DE EMISIONES** (button)

Gráfica 22. Pantalla de ingreso y salida de la selección técnica económica de unidades termoeléctricas, Caso Uno sin restricción de emisión de dióxido de carbono.

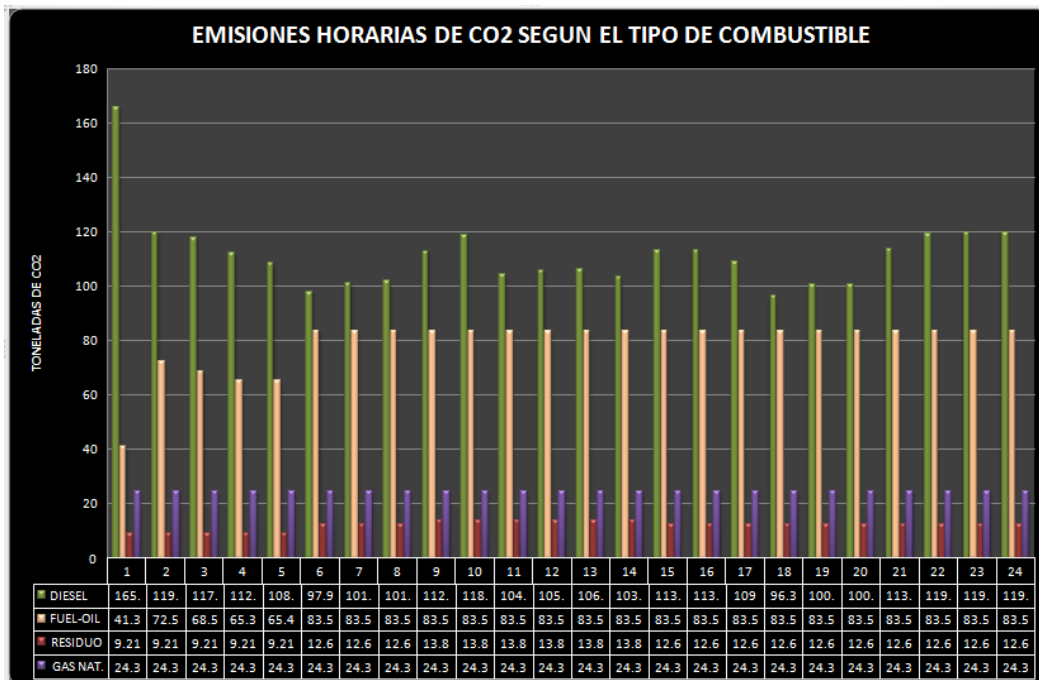
De manera seguida, al mismo problema se incrementa la restricción de emisión de dióxido de carbono con un valor de 5477 Toneladas de CO₂ y nuevamente se realiza la selección de unidades; y se obtiene el despacho horario de las unidades inmiscuidas en el problema, clasificándolas de acuerdo al tipo de combustible, lo que se muestra en la siguiente gráfica.



Gráfica 23. Selección Técnica económica de unidades de acuerdo al tipo de combustible, Caso Uno con restricción de emisión de dióxido de carbono.

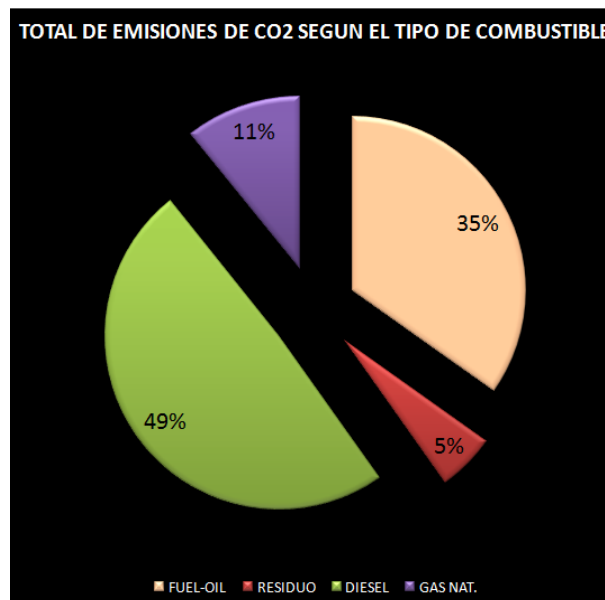
En la selección técnica económica de unidades presente, se puede mirar que se eliminan centrales a residuo despachadas, pero son reemplazadas por centrales térmicas a fuel-oíl y a diesel, mientras que las centras hidroeléctricas entregan la máxima producción de potencia junto a las centrales termoeléctricas a gas natural.

En la gráfica 24 se puede visualizar las emisiones de CO₂ horarias clasificadas por tipo de central para la presente selección técnica económica de unidades generadoras térmicas, en la cual se nota una baja emanación de dióxido de carbono por parte de las centrales térmicas a residuo.



Gráfica 24. Emisiones de CO₂ horarias por tipo de combustible, Caso Uno con restricción de emisión de dióxido de carbono.

A continuación se visualiza la contribución total de emisiones de CO₂ de acuerdo al tipo de combustible para el caso uno, abilitando la restricción de CO₂.



Gráfica 25. Porcentaje de emisiones de CO₂ totales, Caso Uno con restricción de emisión de dióxido de carbono.

Se aprecia un incremento del 4% en la emanación global de CO₂ por parte de las centraler térmicas a diesel, mientras que las centrales termoeléctricas a residuo tienen una reducción del 4% en la emanación global de CO₂; las centrales térmicas a diesel y gas natural no sufren variación en el aporte global de emisión de dióxido de carbono, los valores referidos de la gráfica 25 son los resultados obtenidos de la suma de las emisiones horarias clasificadas por el tipo de combustible y se presentan en la siguiente tabla.

TIPO DE COMBUSTIBLE	TOTAL DE EMISIONES EN TON. CO ₂
DIESEL	2681
FUEL-OÍL	1901
RESIDUO	293
GAS NATURAL	585
EMISIÓN TOTAL DE CO₂	5461

Tabla 4. Total de emisiones de CO₂ por tipo de combustible, Caso Uno con restricción de emisión de dioxido de carbono.

En la gráfica 26 se muestran los datos de salida para el caso uno con la restricción activa de emanación de dióxido de carbono, los mismos que son resultado de la selección técnica económica efectuado por GAMS, donde se encuentra el tipo de solver usado, el costo total que resulta del despacho realizado, el total de emanación de dióxido de carbono que se produce, la cuota hidráulica total que consume el sistema, y el consumo total de combustible DIESEL requerido para el U. C.

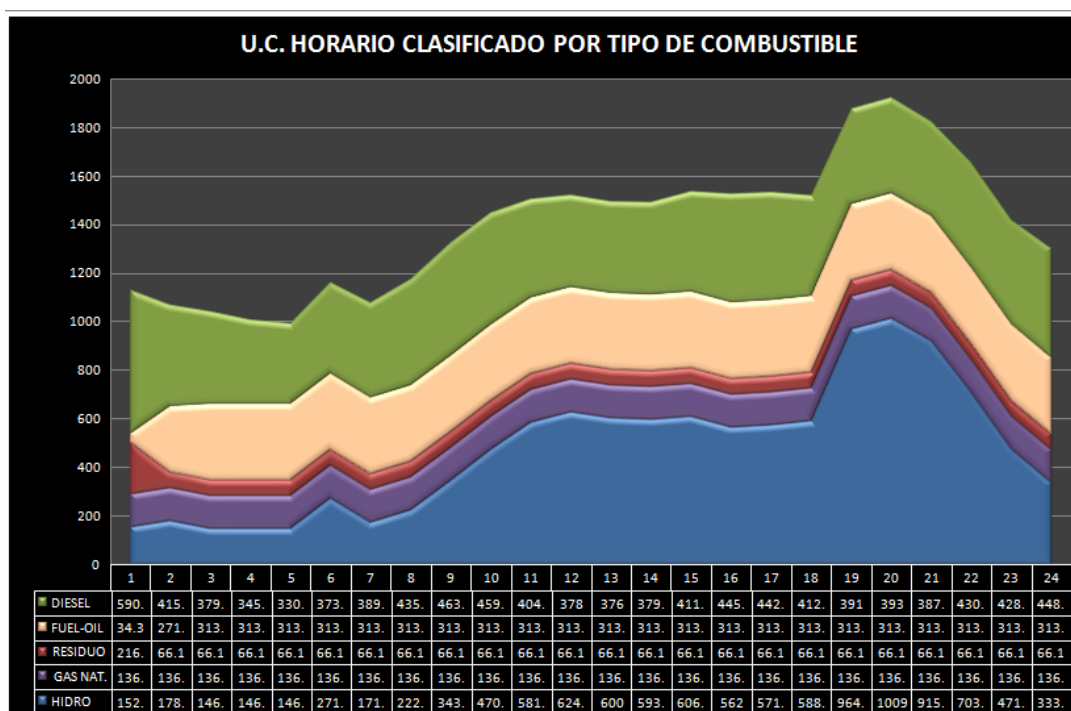
The screenshot displays the SEL-TEC software interface. On the left, the 'DATOS DE INGRESO' (Input Data) panel includes fields for 'CUOTA HIDRAULICA' (10500), 'DISPONIBILIDAD DIESEL' (980000), and 'EMISION CO2' (5477), along with a 'CARGAR DATOS' button. The main area is divided into three sections: 'UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA' header, 'SEL-TEC' title, and 'GAMS' results. The 'GAMS' section shows: Solver: CPLEX, Ecuaciones: 23393 Variables: 4054, Costo Total(\$): 2345180, Emisiones de CO2(Ton): 5461, Cuota Total(MW): 11376, and Disponibilidad DIESEL(Gal): 974772. Below this is an 'APLICAR SOLVER' button. On the right, the 'GRAFICAS' (Charts) panel lists 'SOLUCION', 'DESPACHO', 'EMISIONES', and '% DE EMISIONES'.

Gráfica 26. Pantalla de ingreso y salida de la selección técnica económica de unidades termoeléctricas, Caso Uno con restricción de emisión de dioxido de carbono.

4.4 CASO DOS: CUOA HIDRÁULICA BAJA Y DISPONIBILIDAD DE COMBUSTIBLE DIESEL MÍNIMA.

De la misma manera que el caso anterior se parte desde el caso base, manteniendo los mismos indicios para la modelación, utilizando la misma cuota energética para la central hidráulica Paute y Pucará, la restricción de disponibilidad de combustible (diesel) se activa con un valor de 970000 Galones, y la restricción de emisión de dióxido de carbono se encuentra suspendida de la modelación.

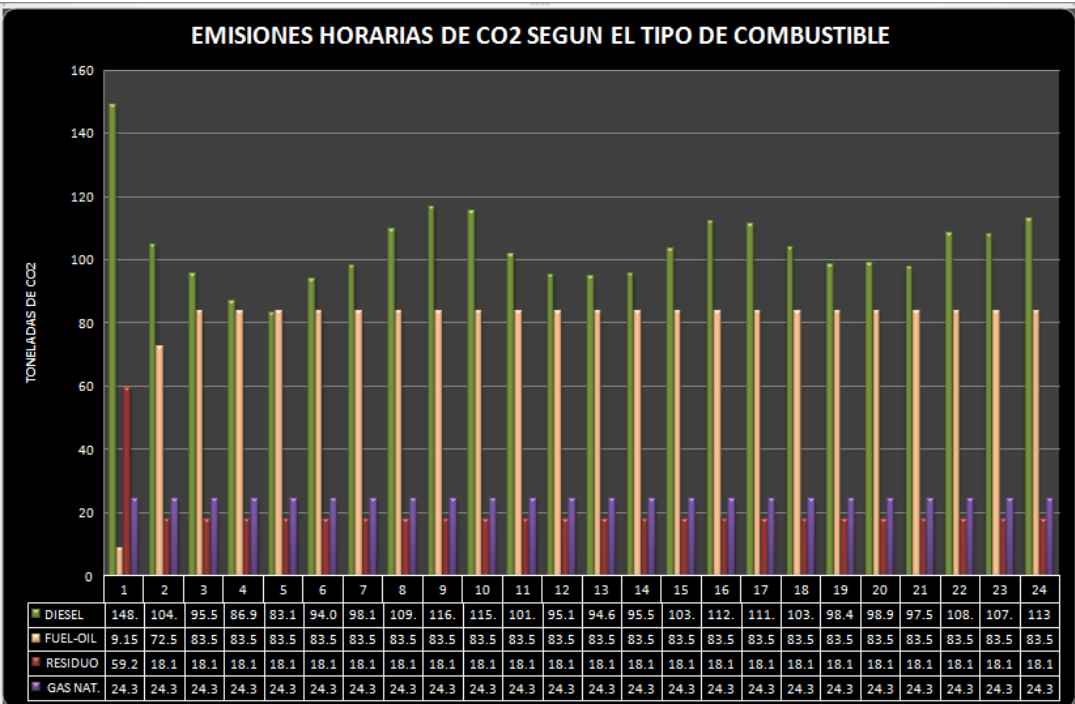
Con éstos datos se realiza la selección técnica económica de unidades de generación y se obtiene el despacho horario de las unidades inmiscuidas en el problema, clasificándolas de acuerdo al tipo de combustible se aprecia la siguiente gráfica.



Gráfica 27. Selección Técnica económica de unidades de acuerdo al tipo de combustible, Caso Dos sin restricción de emisión de dióxido de carbono.

Puesto que se restringe aún más al sistema del combustible diesel, se despachan las centrales térmicas a residuo y a fuel-oíl, supliendo la potencia no generada por parte de las centrales térmicas a diesel, mientras que las centrales térmicas gas natural mantienen su aporte de potencia constante junto a las centrales hidroeléctricas.

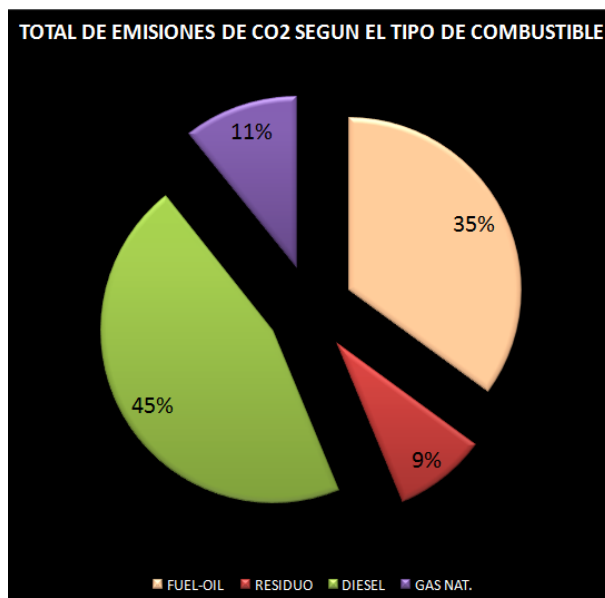
En la gráfica 28 se puede visualizar las emisiones de CO₂ horarias clasificadas por tipo de central para la presente selección técnica económica de unidades generadoras térmicas.



Gráfica 28. Emisiones de CO₂ horarias por tipo de combustible, Caso Dos sin restricción de emisión de dióxido de carbono.

Los niveles de dióxido de carbono expedidos en cada hora por las centrales termoeléctricas que se encuentran dentro de la modelación, son el resultado de la suma de las emisiones individuales de CO₂ de cada tipo de centrales por período de tiempo en el cual se ejecuta la selección técnica económica.

En la gráfica 29 se visualiza la contribución total de emisiones de CO₂ de acuerdo al tipo de combustible para el caso dos, omitiendo la restricción de CO₂.



Gráfica 29. Porcentaje de emisiones de CO2 totales, Caso Dos sin restricción de emisión de dióxido de carbono

Se puede apreciar un claro incremento en la emisión de dióxido de carbono de manera global por parte de las centrales a residuo y fuel-oíl, a manera general la emanación de dióxido de carbono que emite el sistema incrementa, puesto que centrales con combustibles más contaminantes entran en funcionamiento al restringir el sistema del combustible diesel. Los valores referidos de la gráfica 29 son los resultados obtenidos de la suma de las emisiones horarias clasificadas por el tipo de combustible y se presentan en la siguiente tabla:

TIPO DE COMBUSTIBLE	TOTAL DE EMISIONES EN TON. CO ₂
DIESEL	2495
FUEL-OÍL	1920
RESIDUO	476
GAS NATURAL	585
EMISIÓN TOTAL DE CO₂	5477

Tabla 5. Total de emisiones de CO2 por tipo de combustible, Caso Dos sin restricción de emisión de dióxido de carbono.

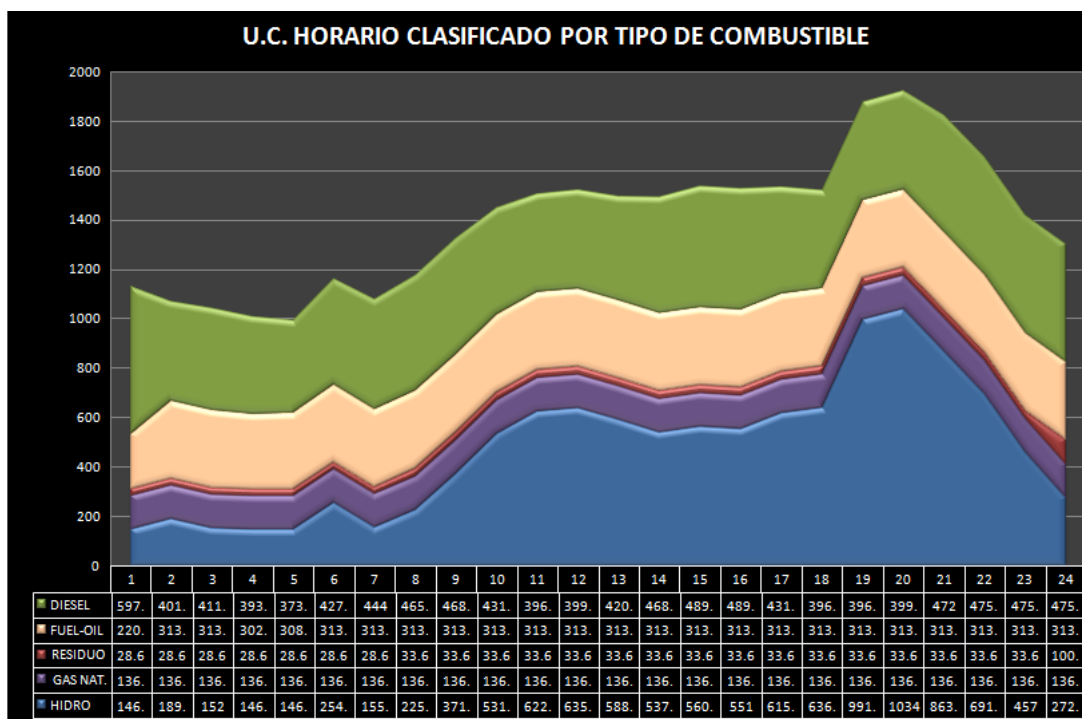
En la gráfica 30 se muestran los datos de salida para el caso dos, los mismos que son resultado de la selección técnica económica efectuado por GAMS, donde se encuentra el tipo de solver usado, el costo total que resulta del despacho realizado, el total de emanación de dióxido de carbono que se produce, la cuota hidráulica total que consume el sistema, y el consumo total de combustible DIESEL requerido para el U. C.

The screenshot displays the SEL-TEC software interface, which is part of the Universidad Politécnica Salesiana's Faculty of Engineering, Electrical Engineering program. The interface is divided into several sections:

- DATOS DE INGRESO (Input Data):** Located on the left, it includes fields for 'CUOTA HIDRAULICA' (Hydraulic Quota) set to 10500, 'DISPONIBILIDAD DIESEL' (Diesel Availability) set to 970000, and 'EMISION CO2' (CO2 Emission). A 'CARGAR DATOS' (Load Data) button is at the bottom.
- GAMS (Solver Results):** Located in the center, it displays the results of the optimization: 'Solver: CPLEX', 'Ecuaciones: 23392 Variables: 4054', 'Costo Total(\$): 2322805', 'Emisiones de CO2(Ton): 5477', 'Cuota Total(MW): 11376', and 'Disponibilidad DIESEL(Gal): 899346'. An 'APLICAR SOLVER' (Apply Solver) button is at the bottom.
- GRAFICAS (Graphics):** Located on the right, it contains buttons for 'SOLUCION' (Solution), 'DESPACHO' (Dispatch), 'EMISIONES' (Emissions), and '% DE EMISIONES' (% of Emissions).

Gráfica 30. Pantalla de ingreso y salida de la selección técnica económica de unidades termoeléctricas, Caso Dos sin restricción de emisión de dióxido de carbono.

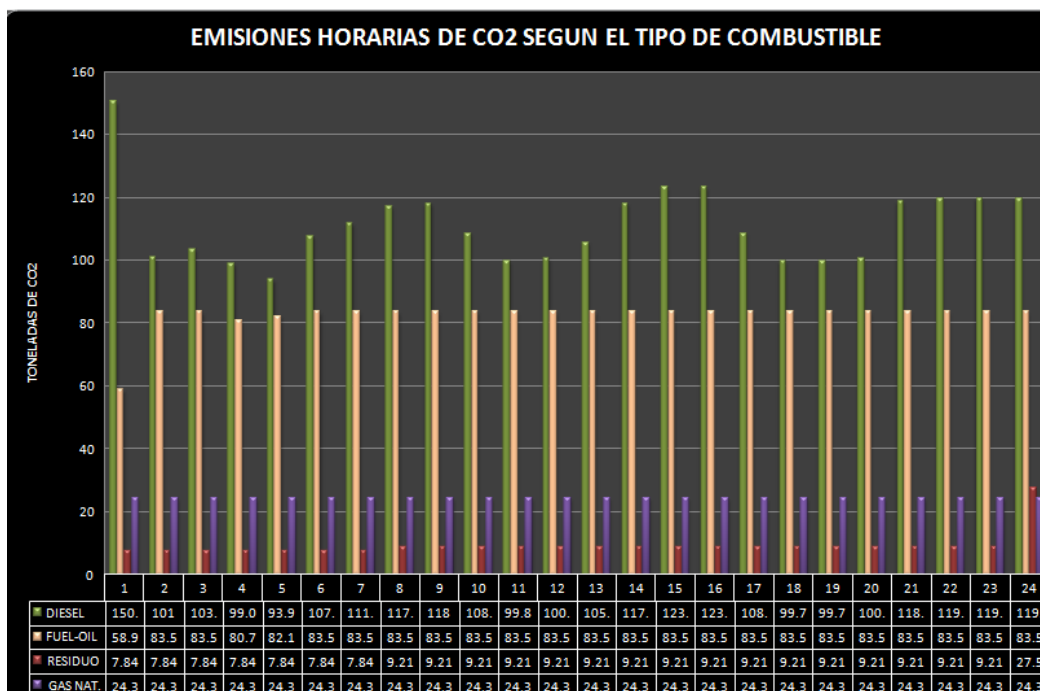
Al mismo problema se incrementa la restricción de emisión de gases contaminantes (dióxido de carbono) con un valor de 5477 Toneladas de CO₂ y nuevamente se realiza la selección de unidades; y se obtiene el despacho horario de las unidades inmiscuidas en el problema, clasificándolas de acuerdo al tipo de combustible, lo cual se muestra en la siguiente gráfica.



Gráfica 31. Selección Técnica económica de unidades de acuerdo al tipo de combustible, Caso Dos con restricción de emisión de dióxido de carbono.

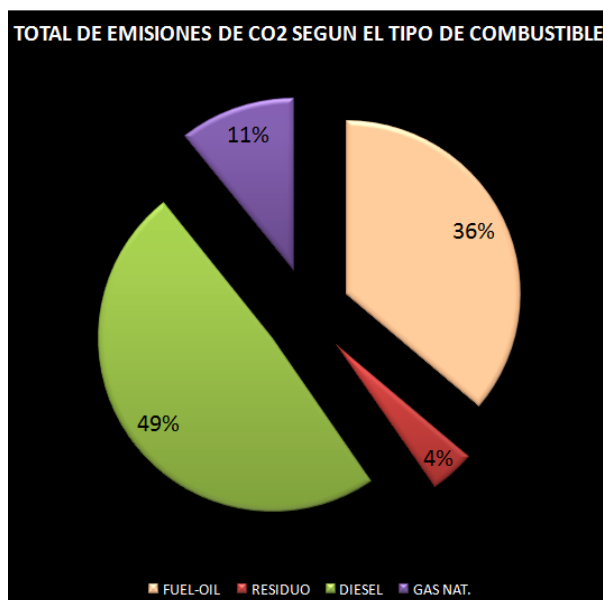
En la gráfica 31 se puede apreciar un incremento de potencia por parte de las centrales termoeléctricas a fuel-oíl y diesel para suplir la potencia de las centrales térmicas a residuo; mientras que las centrales termoeléctricas a gas natural entregan su máxima potencia a lo largo del período junto a las centrales hidroeléctricas.

En la gráfica 32 se puede observar las emisiones de dióxido de carbono horarias por parte de las centrales termoeléctricas clasificadas de acuerdo al tipo de combustible usado.



Gráfica 32. Emisiones de CO₂ horarias por tipo de combustible, Caso Dos con restricción de emisión de dióxido de carbono.

En la gráfica 33 se puede ver la contribución total de emisiones de CO₂ de acuerdo al tipo de combustible para el caso dos con la restricción de emisión de dióxido de carbono activa.



Gráfica 33. Porcentaje de emisiones de CO₂ totales, Caso Dos con restricción de emisión de dióxido de carbono

De manera global existe un incremento en la emanación de CO₂ por parte de las centrales termoeléctricas a diesel en un 4%; las centrales termoeléctricas a residuo decrecen en 5%; mientras las centrales térmicas a fuel-oíl incrementan en 1%, y las centrales termoeléctricas a gas natural no sufren cambios en la emanación de CO₂. Los valores referidos de la gráfica 33 se presentan en la siguiente tabla.

TIPO DE COMBUSTIBLE	TOTAL DE EMISIONES EN TON. CO ₂
DIESEL	2668
FUEL-OÍL	1977
RESIDUO	229
GAS NATURAL	585
EMISIÓN TOTAL DE CO₂	5460

Tabla 6. Total de emisiones de CO₂ por tipo de combustible, Caso Dos con restricción de emisión de dióxido de carbono.

En la gráfica 34 se muestran los datos de salida para el caso dos, los mismos que son resultado de la selección técnica económica efectuado por GAMS, donde se encuentra el tipo de solver usado, el costo total que resulta del despacho realizado, el total de emanación de dióxido de carbono que se produce, la cuota hidráulica total que consume el sistema, y el consumo total de combustible DIESEL requerido para el U. C.

The screenshot displays the SEL-TEC software interface, which is part of the Universidad Politécnica Salesiana's Faculty of Engineering, Electrical Engineering program. The interface is divided into three main sections:

- DATOS DE INGRESO (Input Data):** This section on the left contains three input fields with up/down arrows:
 - CUOTA HIDRAULICA: 10500
 - DISPONIBILIDAD DIESEL: 970000
 - EMISION CO2: 5477
 Below these fields is a button labeled "CARGAR DATOS".
- GAMS (Solver Results):** The central section displays the results of the GAMS solver:
 - Solver: CPLEX
 - Ecuaciones: 23393 Variables: 4054
 - Costo Total(\$): 2353424
 - Emisiones de CO2(Ton): 5460
 - Cuota Total(MW): 11376
 - Disponibilidad DIESEL(Gal): 969605
 A button labeled "APLICAR SOLVER" is located at the bottom of this section.
- GRAFICAS (Graphics):** The right section contains four buttons: "SOLUCION", "DESPACHO", "EMISIONES", and "% DE EMISIONES".

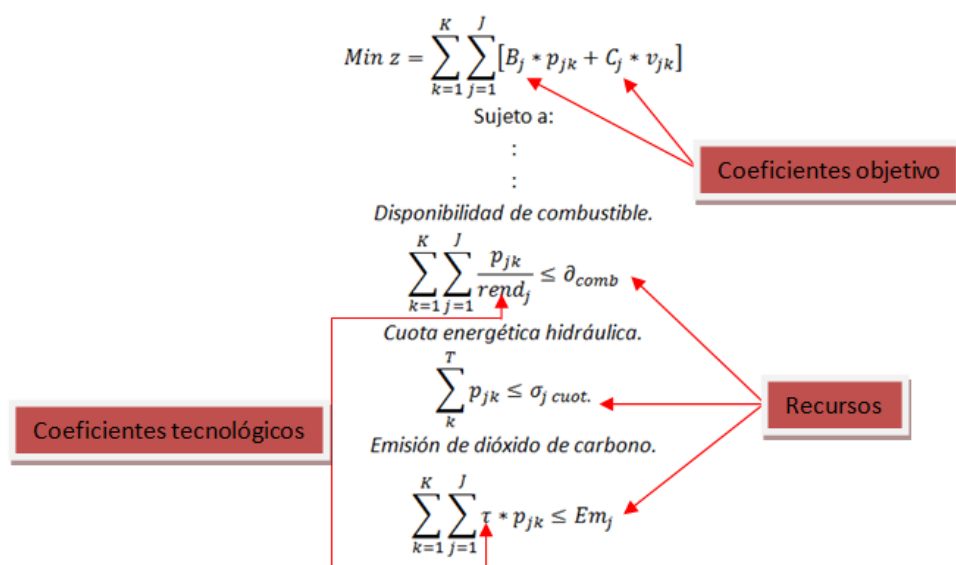
Gráfica 34. Pantalla de ingreso y salida de la selección técnica económica de unidades termoeléctricas, Caso Dos con restricción de emisión de dióxido de carbono.

4.5 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.

El análisis de sensibilidad consiste en determinar como se ve afectada la respuesta óptima del problema ante cambios (dentro de un rango permisible) en: los coeficientes de la función objetivo (costos), en los términos independientes de las restricciones (disponibilidad de recursos), ó en los coeficientes que afectan a las variables de las restricciones (coeficientes tecnológicos).

La variación de los datos del problema se analizan de manera individual, es decir, se analiza la sensibilidad de la solución debido a la modificación de un dato a la vez, asumiendo que todos los demás datos se encuentran sin alteración; esto es importante porque se habla de una sensibilidad es estática.

El Análisis de Sensibilidad se utiliza para examinar los efectos de cambios en tres áreas diferenciadas del problema, en la gráfica siguiente se muestran lo citado.



Gráfica 35. Áreas de estudio para el análisis de sensibilidad.

- **En los coeficientes de la función objetivo (coeficientes objetivo).**- Los cambios en los coeficientes objetivos no afectan la gráfica de la región factible, por lo que no afecta a la solución óptima del problema aunque sí al valor de la función objetivo.

- **Los coeficientes tecnológicos (aquellos coeficientes que afectan a las variables de las restricciones, situados a la izquierda de la desigualdad).**- Los cambios en estos coeficientes provocarán cambios sustanciales en la forma de la región factible. Lo que varía es la pendiente de las rectas que representan las restricciones.
- **Los recursos disponibles (los términos independientes de cada restricción, situados a la derecha de la desigualdad).**- Los cambios en los términos independientes de las restricciones suponen desplazamientos paralelos de las rectas asociadas a las mismas, lo cual hará variar la forma de la región factible y, con ello, a la solución óptima.

4.5.1 SENSIBILIDAD ANTE LA DISPONIBILIDAD DE COMBUSTIBLE.

Para el análisis de sensibilidad de la selección técnica económica de unidades de generación térmicas ante la disponibilidad de combustible diesel, se toma la misma demanda estimada del caso base, una cuota energética hidráulica para la central Paute de 10500 MW y para la central de Pucará de 910MW, la emisión de dióxido de carbono con un valor 6500 toneladas, y la disponibilidad de combustible diesel varía desde 1000000 hasta 600000 en pasos de 100000 galones.

Para cada uno de los pasos se realiza la corrida del programa optimizador ingresando los datos de entrada de manera manual, cada ingreso representa un caso como se puede apreciar de manera seguida

CASO 1:

ENTRADAS		SALIDAS	
CUOTA HIDRO PAUTE (MWh) =	10 500	COSTO (\$)	2 291 218
DISPONIBILIDAD (GALONES) <	1 000 000	DISPONIBILIDAD (GALONES)	952 369
EMISIONES DE CO2 (TON DE CO ₂) <	6 500	EMISIONES DE CO2 (TON DE CO ₂)	5 469
		CUOTA TOTAL HIDRO (MWh)	11 376

Tabla 7. Datos de entradas y salidas del CASO 1 para el U.C. análisis de sensibilidad ante la disponibilidad de combustible diesel.

CASO 2:

ENTRADAS		SALIDAS	
CUOTA HIDRO PAUTE (MWh) =	10 500	COSTO (\$)	2 305 366
DISPONIBILIDAD (GALONES) <	900 000	DISPONIBILIDAD (GALONES)	899 547
EMISIONES DE CO2 (TON DE CO ₂) <	6 500	EMISIONES DE CO2 (TON DE CO ₂)	5 477
		CUOTA TOTAL HIDRO (MWh)	11 376

Tabla 8. Datos de entradas y salidas del CASO 2 para el U.C. análisis de sensibilidad ante la disponibilidad de combustible diesel.

CASO 3:

ENTRADAS		SALIDAS	
CUOTA HIDRO PAUTE (MWh) =	10 500	COSTO (\$)	2 472 506
DISPONIBILIDAD (GALONES) <	800 000	DISPONIBILIDAD (GALONES)	708 292
EMISIONES DE CO2 (TON DE CO ₂) <	6 500	EMISIONES DE CO2 (TON DE CO ₂)	5 519
		CUOTA TOTAL HIDRO (MWh)	11 376

Tabla 9. Datos de entradas y salidas del CASO 3 para el U.C. análisis de sensibilidad ante la disponibilidad de combustible diesel.

CASO 4:

ENTRADAS		SALIDAS	
CUOTA HIDRO PAUTE (MWh) =	10 500	COSTO (\$)	2 496 626
DISPONIBILIDAD (GALONES) <	700 000	DISPONIBILIDAD (GALONES)	680 375
EMISIONES DE CO2 (TON DE CO ₂) <	6 500	EMISIONES DE CO2 (TON DE CO ₂)	5 525
		CUOTA TOTAL HIDRO (MWh)	11 376

Tabla 10. Datos de entradas y salidas del CASO 4 para el U.C. análisis de sensibilidad ante la disponibilidad de combustible diesel.

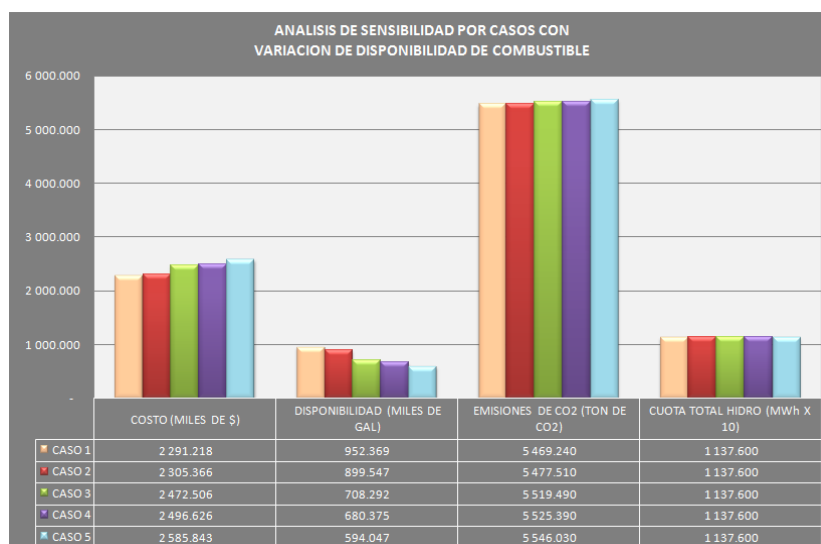
CASO 5:

ENTRADAS	
CUOTA HIDRO PAUTE (MWh) =	10 500
DISPONIBILIDAD (GALONES) <	600 000
EMISIONES DE CO2 (TON DE CO ₂) <	6 500

SALIDAS	
COSTO (\$)	2 585 843
DISPONIBILIDAD (GALONES)	594 047
EMISIONES DE CO2 (TON DE CO ₂)	5 546
CUOTA TOTAL HIDRO (MWh)	11 376

Tabla 11. Datos de entradas y salidas del CASO 5 para el U.C. análisis de sensibilidad ante la disponibilidad de combustible diesel.

La evolución del despacho y las emisiones de dióxido de carbono de cada caso del análisis de sensibilidad ante la disponibilidad de combustible diesel se presentan en el ANEXO 2; a continuación se muestra una gráfica del resumen de los datos de salida del programa optimizador GAMS.



Gráfica 36. Resumen, Sensibilidad ante la disponibilidad de combustible.

De la gráfica se puede apreciar que existe un incremento en el costo del U.C. mientras se disminuye la disponibilidad de combustible diesel, puesto que se intensifica el despacho de otro tipo de unidades termoeléctricas (fuel-oíl y residuo) razón por la cual los costos se incrementan; también se mira que la cuota hidráulica total se mantiene constante ya que es la más barata y no es contaminante, y la emisión de dióxido de carbono tiende a incrementar.

4.5.2 SENSIBILIDAD ANTE LA CUOTA ENERGÉTICA.

Para el análisis de sensibilidad de la selección técnica económica de unidades de generación térmicas ante la cuota energética hidráulica de la central Paute, se toma la misma demanda pronosticada del caso base, una disponibilidad del combustible diesel de 1500000 galones, la emisión de dióxido de carbono con un valor de 6500 toneladas de CO₂, una cuota energética hidráulica para la central de Pucará de 910MWh, y para la central Paute la cuota varía desde 8000 hasta 12000 MWh en cinco pasos sucesivos.

Para cada uno de los pasos se realiza la corrida del programa optimizador ingresando los datos de entrada de manera manual, cada ingreso representa un caso como se puede apreciar a continuación.

CASO 1:

ENTRADAS		SALIDAS	
CUOTA HIDRO PAUTE (MWh) =	8 000	COSTO (\$)	2 749 289
DISPONIBILIDAD (GALONES) <	1 500 000	DISPONIBILIDAD (GALONES)	981 213
EMISIONES DE CO2 (TON DE CO ₂) <	6 500	EMISIONES DE CO2 (TON DE CO ₂)	6 148
		CUOTA TOTAL HIDRO (MWh)	8 876

Tabla 12. Datos de entradas y salidas del CASO 1 para el U.C. análisis de sensibilidad ante la cuota hidráulica de la central Paute.

CASO 2:

ENTRADAS		SALIDAS	
CUOTA HIDRO PAUTE (MWh) =	9 000	COSTO (\$)	2 562 362
DISPONIBILIDAD (GALONES) <	1 500 000	DISPONIBILIDAD (GALONES)	983 015
EMISIONES DE CO2 (TON DE CO ₂) <	6 500	EMISIONES DE CO2 (TON DE CO ₂)	5 872
		CUOTA TOTAL HIDRO (MWh)	9 876

Tabla 13. Datos de entradas y salidas del CASO 2 para el U.C. análisis de sensibilidad ante la cuota hidráulica de la central Paute.

CASO 3:

ENTRADAS		SALIDAS	
CUOTA HIDRO PAUTE (MWh) =	10 000	COSTO (\$)	2 366 730
DISPONIBILIDAD (GALONES) <	1 500 000	DISPONIBILIDAD (GALONES)	984 825
EMISIONES DE CO2 (TON DE CO ₂) <	6 500	EMISIONES DE CO2 (TON DE CO ₂)	5 597
		CUOTA TOTAL HIDRO (MWh)	10 876

Tabla 14. Datos de entradas y salidas del CASO 3 para el U.C. análisis de sensibilidad ante la cuota hidráulica de la central Paute.

CASO 4:

ENTRADAS		SALIDAS	
CUOTA HIDRO PAUTE (MWh) =	11 000	COSTO (\$)	2 185 662
DISPONIBILIDAD (GALONES) <	1 500 000	DISPONIBILIDAD (GALONES)	991 117
EMISIONES DE CO2 (TON DE CO ₂) <	6 500	EMISIONES DE CO2 (TON DE CO ₂)	5 330
		CUOTA TOTAL HIDRO (MWh)	11 876

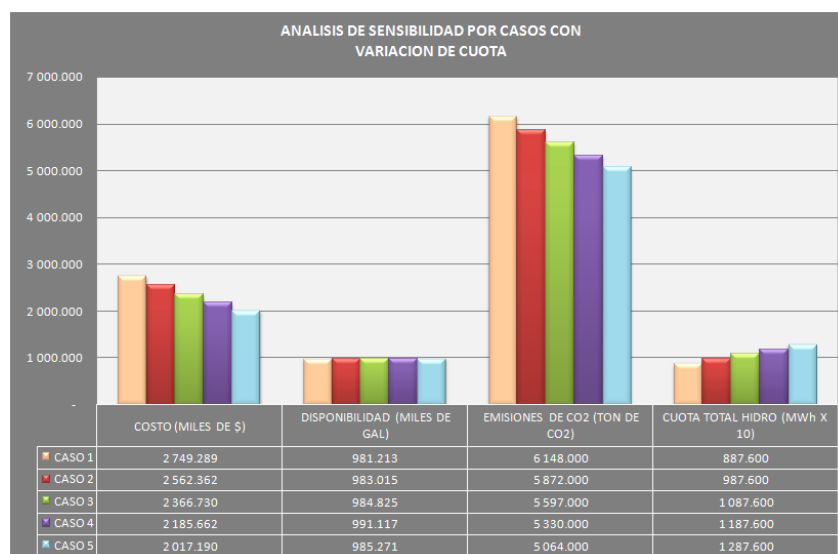
Tabla 15. Datos de entradas y salidas del CASO 4 para el U.C. análisis de sensibilidad ante la cuota hidráulica de la central Paute.

CASO 5:

ENTRADAS		SALIDAS	
CUOTA HIDRO PAUTE (MWh) =	12 000	COSTO (\$)	2 017 190
DISPONIBILIDAD (GALONES) <	1 500 000	DISPONIBILIDAD (GALONES)	985 271
EMISIONES DE CO2 (TON DE CO ₂) <	6 500	EMISIONES DE CO2 (TON DE CO ₂)	5 064
		CUOTA TOTAL HIDRO (MWh)	12 876

Tabla 16. Datos de entradas y salidas del CASO 5 para el U.C. análisis de sensibilidad ante la cuota hidráulica de la central Paute.

La evolución del despacho y las emisiones de dióxido de carbono de cada caso del análisis de sensibilidad ante la cuota hidráulica se presentan en el ANEXO 3; a continuación se muestra una gráfica del resumen de los datos de salida del programa optimizador GAMS.



Gráfica 37. Resumen, Sensibilidad ante la cuota hidráulica.

De la gráfica resumen se puede apreciar que existe una reducción en el precio del U.C. mientras se incrementa la cuota hidroeléctrica, puesto que se simula un escenario de estiaje y se despachan más unidades termoeléctricas; también se observa que la disponibilidad de combustible diesel pronosticado para el despacho tiene un leve incremento, y la emisión de dióxido de carbono se disminuye.

4.5.3 SENSIBILIDAD ANTE LA EMISIÓN DE CO₂.

Para el análisis de sensibilidad de la selección técnica económica de unidades de generación térmicas ante la emisión de CO₂, se toma la misma demanda pronosticada del caso base, una disponibilidad del combustible diesel de 980000 galones, la cuota energética hidráulica para la central de Paute de 10500MWh y Pucará con 910MWh, mientras se reduce la emisión de dióxido de carbono en tres pasos; en cada paso se realiza la corrida del programa optimizador, ingresando los datos de entrada de manera manual, cada ingreso representa un caso como se puede apreciar a continuación.

CASO 1:

ENTRADAS		SALIDAS	
CUOTA HIDRO PAUTE (MWh) <	10 500	COSTO (\$)	2 345 180
DISPONIBILIDAD (GALONES) <	980 000	DISPONIBILIDAD (GALONES)	974 772
EMISIONES DE CO2 (TON DE CO ₂) <	5 477	EMISIONES DE CO2 (TON DE CO ₂)	5 461
		CUOTA TOTAL HIDRO (MWh)	11 376

Tabla 17. Datos de entradas y salidas del CASO 1 para el U.C. análisis de sensibilidad ante la emisión de CO₂.

CASO 2:

ENTRADAS		SALIDAS	
CUOTA HIDRO PAUTE (MWh) <	10 500	COSTO (\$)	2 338 096
DISPONIBILIDAD (GALONES) <	980 000	DISPONIBILIDAD (GALONES)	976 095
EMISIONES DE CO2 (TON DE CO ₂) <	5 461	EMISIONES DE CO2 (TON DE CO ₂)	5 460
		CUOTA TOTAL HIDRO (MWh)	11 376

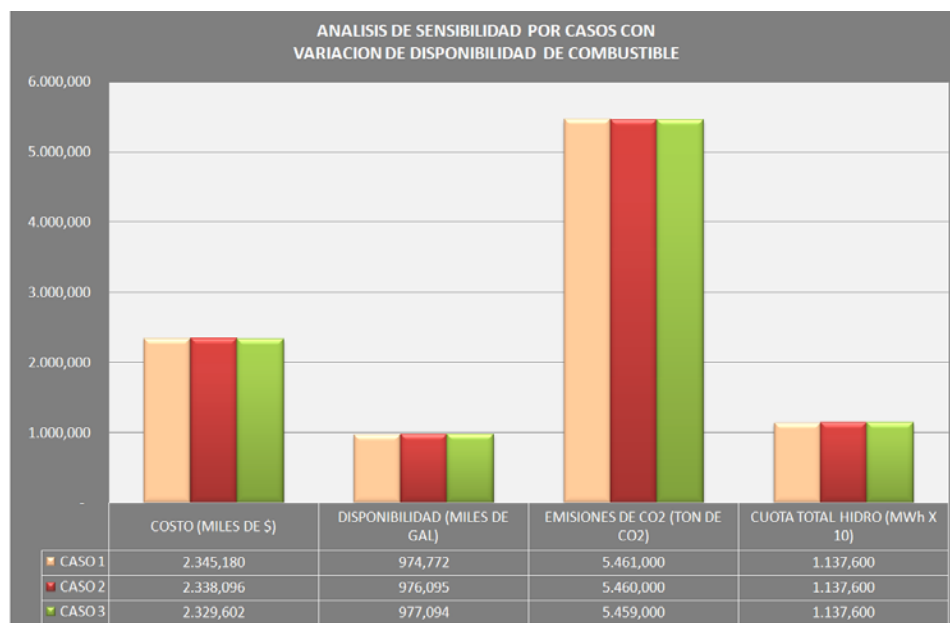
Tabla 18. Datos de entradas y salidas del CASO 2 para el U.C. análisis de sensibilidad ante la emisión de CO₂.

CASO 3:

ENTRADAS		SALIDAS	
CUOTA HIDRO PAUTE (MWh) <	10 500	COSTO (\$)	2 329 602
DISPONIBILIDAD (GALONES) <	980 000	DISPONIBILIDAD (GALONES)	977 094
EMISIONES DE CO2 (TON DE CO ₂) <	5 460	EMISIONES DE CO2 (TON DE CO ₂)	5 459
		CUOTA TOTAL HIDRO (MWh)	11 376

Tabla 19. Datos de entradas y salidas del CASO 3 para el U.C. análisis de sensibilidad ante la emisión de CO₂.

La evolución del despacho y las emisiones de dióxido de carbono de cada caso del análisis de sensibilidad ante la emisión de CO₂ se presentan en el ANEXO 4; a continuación se muestra una gráfica del resumen de los datos de salida del programa optimizador GAMS.



Gráfica 38. Resumen, Sensibilidad ante la emisión de CO₂.

4.6 EVALUACIÓN DE RESULTADOS.

4.6.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LOS CASOS DE ESTUDIO.

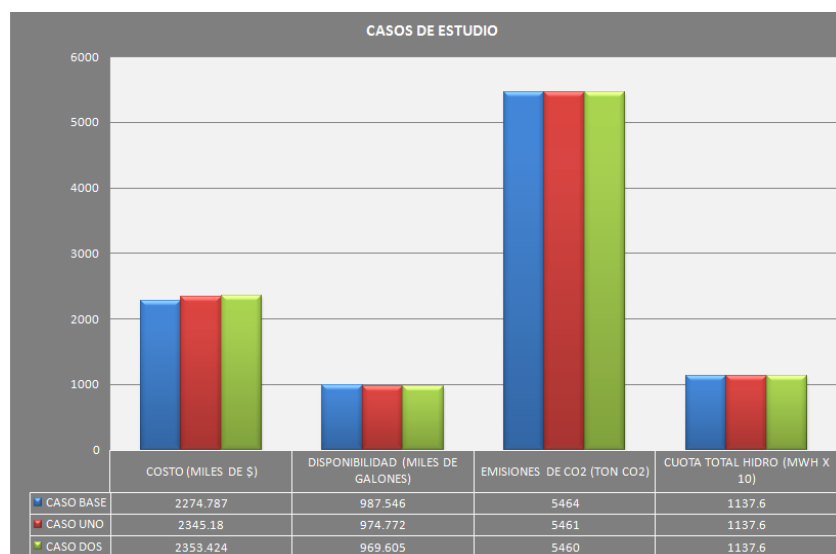
Cuando se restringe al sistema con la disponibilidad de combustible diesel se empiezan a despachar las centrales a fuel-oíl y mientras se limita mucho más se van despachando las centrales a residuo; mientras tanto el costo total del U.C. se incrementa.

Por lo tanto para los casos de estudio la relación que presentan la disponibilidad de combustible diesel es inversamente proporcional con respecto al costo total del U.C., puesto que al disminuir la cantidad de combustible diesel en la modelación, el sistema se ve forzado a seleccionar otras unidades térmicas, lo que produce un incremento en el costo total de la selección de unidades.

Al tener la restricción de las emanaciones de dióxido de carbono (disminución de CO₂) y de disponibilidad de combustible (disminución de diesel) activas en los casos de estudio, el costo total de la selección de unidades sufre un incremento, puesto que el sistema empieza a

despachar otro tipo de unidades térmicas que a su vez son menos contaminantes, reemplazando a las unidades a diesel y con otro tipo de costos fijos y de producción.

De los datos de salida de la selección técnica económica efectuado por GAMS en un escenario de estiaje para la central hidroeléctrica Paute (10.5 GWh), con la restricción de emisión de CO₂ activada a no más de 5477 toneladas y reduciendo la disponibilidad de combustible DIESEL no más de 980000 galones, se tiene un incremento en el costo total del U.C. con respecto al despacho normal de 70393 \$ y la emisión de dióxido de carbono se reduce en 3 toneladas; al reducir la disponibilidad de combustible DIESEL a no más de 970000 galones con la restricción de emisión de CO₂ activada a no más de 5477 toneladas, se tiene un incremento en el costo total del U.C. con respecto al despacho normal de 78637 \$ y la emisión de dióxido de carbono disminuye en 4 toneladas. Por lo tanto se observa un incremento en el costo total de la selección de unidades con una reducción de emanaciones de dióxido de carbono; los datos de salida del U.C. ejecutado por el programa optimizador se presentan en la siguiente gráfica.



Gráfica 39. Resumen de los casos de estudio.

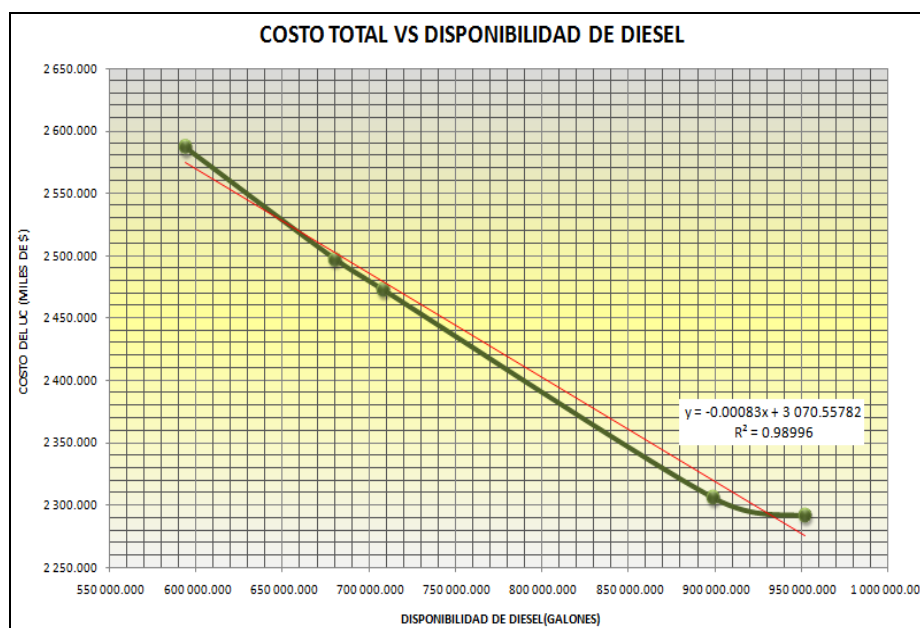
De la gráfica 39 al hacer una relación costo y emisión de CO₂, para caso base y con las centrales propuestas en el problema se tiene un costo total 416.32 \$ por cada tonelada de CO₂, al momento de realizar la selección técnica económica de unidades termoeléctricas

con las restricciones propuestas para el caso uno se tiene un costo por cada tonelada de CO₂ de 429.44 \$, para el caso dos se tiene que el costo por cada tonelada de CO₂ es de 431.03 \$.

4.6.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA SENSIBILIDAD ANTE LA DISPONIBILIDAD DE COMBUSTIBLE.

En la selección técnica económica de unidades de generación térmicas, se mantiene una cuota hidráulica para la central Paute de 10500 MWh y para la central de Pucará de 910 MWh, mientras la disponibilidad de combustible diesel decrece desde 1000000 de galones hasta 600000 galones; en cada caso la cuota hidráulica se mantiene constante, y no tiene variación con respecto al costo del U.C.

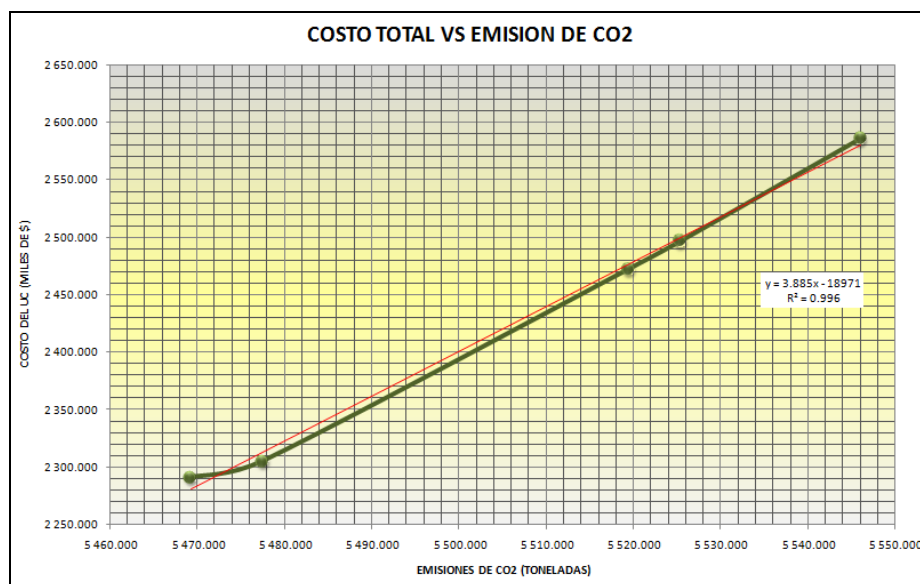
A medida que se hace disminuir el valor de la disponibilidad de combustible diesel (dato de entrada del problema de la selección técnica económica de unidades generadoras térmicas) el costo total de la selección de unidades incrementa, por lo tanto la disponibilidad de combustible diesel del parque generador térmico mantiene una relación inversamente proporcional con el costo total del U. C. lo cual se puede observar en la siguiente gráfica.



Gráfica 40. Costo total del U.C. en función de la disponibilidad de combustible diesel, Sensibilidad ante la disponibilidad de combustible diesel.

Al disminuir la disponibilidad de diesel el sistema empieza a complementar la potencia no entregada por medio de centrales a fuel-oíl, y a medida que decrece mucho más el combustible diesel se empiezan a despachar centrales a residuo, manteniendo constante el despacho de las unidades hidráulicas junto a las de gas natural; esto produce que en cada uno de los pasos se incremente la emisión de dióxido de carbono, puesto que el fuel-oíl posee un coeficiente de emisión de CO₂ más elevado que el diesel, y el residuo tiene un coeficiente de emisión de gas contaminante más elevado que el fuel-oíl; por lo tanto la emisión de dióxido de carbono mantiene una relación inversamente proporcional con la disponibilidad de combustible diesel del parque generador térmico, puesto que al restringir al sistema de combustible diesel, se obliga a que otras centrales termoeléctricas más contaminantes suplan la potencia horaria que no alcanzan a cubrir las centrales térmicas a diesel.

Mientras se disminuye la disponibilidad de combustible diesel en el parque generador térmico, la emanación de dióxido de carbono incrementa y el costo total del U.C. también, entonces la relación que se da entre el costo y la emanación de CO₂ ante una reducción en la disponibilidad de combustible es directamente proporcional lo que se puede observar en la siguiente gráfica.



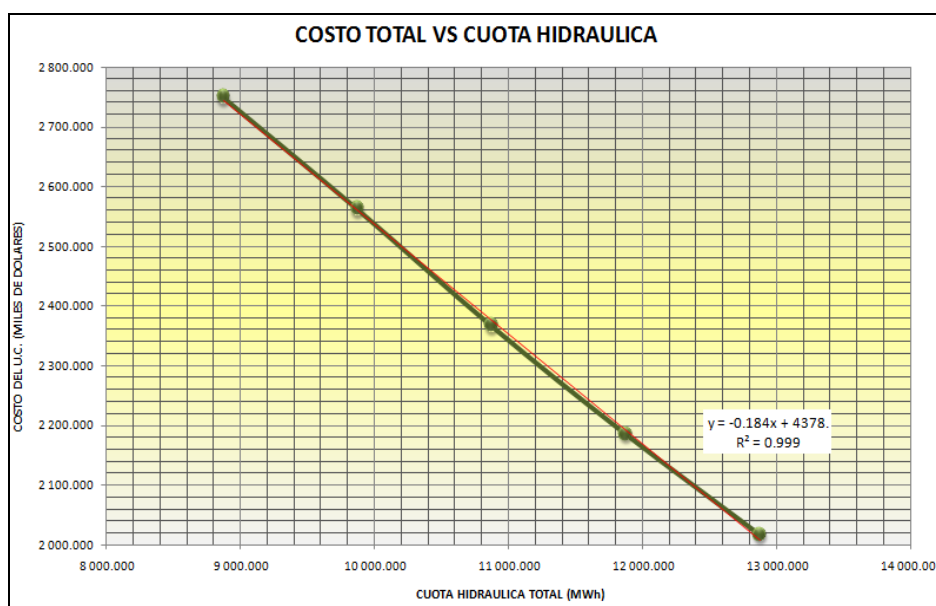
Gráfica 41. Costo total del U.C. en función de la emanación de CO₂, Sensibilidad ante la disponibilidad de combustible diesel.

De la ecuación de tendencia de la gráfica 41, la selección técnica económica de unidades térmicas muestra una sensibilidad ante la variación de la disponibilidad de combustible diesel puesto que por cada tonelada de CO₂ se incrementa el costo total del U.C. en 4000 \$.

4.6.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA SENSIBILIDAD ANTE LA CUOTA ENERGÉTICA.

Para la selección técnica económica de unidades de generación térmicas, se mantiene una cuota hidráulica para Pucará de 910 MWh, la disponibilidad de combustible diesel de 1500000 galones; mientras que la cuota hidráulica de Paute aumenta desde 8000 MWh hasta 12000 MWh; en cada uno de los despachos realizados por casos se denota que la disponibilidad de combustible tiene una leve variación, puesto que el sistema busca la solución a un mínimo costo.

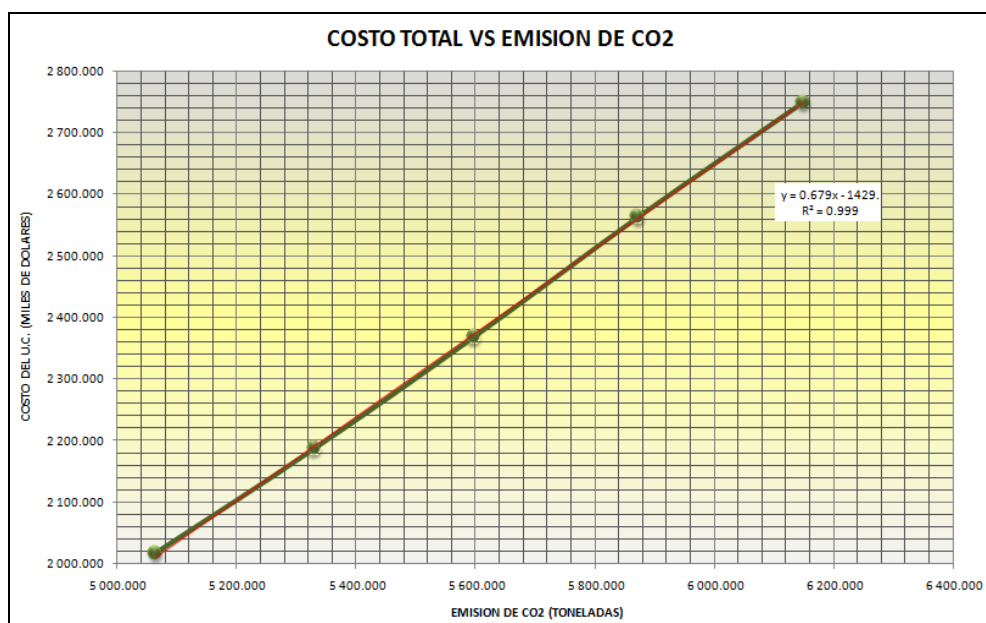
Mientras se eleva el valor de cuota hidroeléctrica de la central Paute (dato de entrada del problema de la selección técnica económica de unidades generadoras térmicas) se reduce el costo total del U.C., por lo tanto mantienen una relación inversamente proporcional, lo cual se puede apreciar en la siguiente gráfica.



Gráfica 42. Costo total del U.C. en función de la cuota hidroeléctrica, Sensibilidad ante la cuota hidráulica.

Al incrementar la producción de energía hidroeléctrica por parte de Paute, se desalojan del sistema las centrales termoeléctricas más contaminantes y menos eficientes; en cada incremento de la cuota hidroeléctrica se empiezan a despachar las centrales térmicas a diesel, desplazando a las centrales a residuo, y por último a las centrales a fuel-oíl, por lo tanto la emanación total de dióxido de carbono disminuye en cada caso.

A medida que aumenta la cuota hidroeléctrica, el costo total de U.C. disminuye, y la emanación de dióxido de carbono también se reduce en cada paso del análisis de sensibilidad, por lo tanto se tiene una relación directamente proporcional entre el costo y la emisión de dióxido de carbono, lo cual se puede apreciar en la siguiente gráfica.



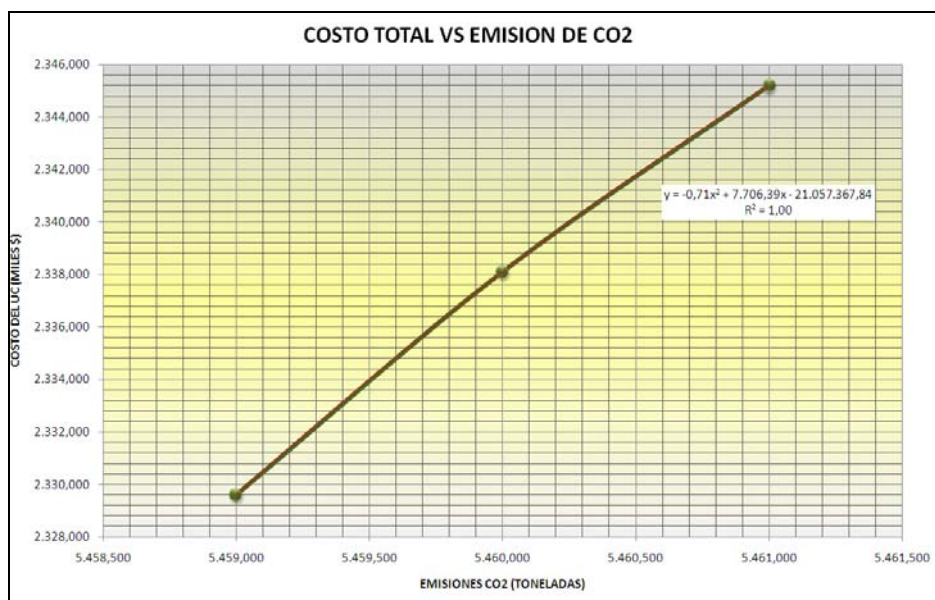
Gráfica 43. Costo total del U.C. en función de la emanación de CO₂, Sensibilidad ante la cuota hidráulica.

De la ecuación de tendencia de la gráfica 43 la selección técnica económica de unidades térmicas muestra una sensibilidad ante la variación de la cuota hidráulica puesto que por cada tonelada de CO₂ el costo total del U.C. sube en 679 \$.

4.6.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA SENSIBILIDAD ANTE EMISIÓN DE CO₂.

En la selección técnica económica de unidades de generación térmicas, se mantiene una cuota hidráulica para la central Paute de 10500 MWh y para la central de Pucará de 910 MWh, con una disponibilidad de combustible diesel de 980000 galones; en cada caso la cuota hidráulica y la disponibilidad de combustible se mantiene constante mientras se hace variar la emisión de dióxido de carbono en tres pasos sucesivos, en cada uno de los despachos realizados por casos se denota que la disponibilidad de combustible se incrementa, cumpliendo con la restricción impuesta.

Mientras que se reduce el valor de emisión total de dióxido de carbono (dato de entrada del problema de la selección técnica económica de unidades generadoras térmicas) el costo total del U.C. disminuye para cada caso, lo cual se puede apreciar en la siguiente gráfica.



Gráfica 44. Costo total en función de la emisión de CO₂, Sensibilidad ante la emanación de CO₂.

A medida que se reduce el valor de emanación de dióxido de carbono en la selección técnica económica de unidades termoeléctricas, se mantiene el consumo de la cuota

hidroeléctrica junto con las centrales a gas natural, puesto que son las más baratas y menos contaminantes del sistema, mientras el costo total del U.C. se reduce en cada caso.

Al forzar al sistema a bajar la emanación de dióxido de carbono se empiezan a despachar las centrales a diesel y fuel-oíl supliendo a las centrales a residuo, puesto que las centrales térmicas a residuo son las que emanan mayor cantidad de dióxido de carbono, por lo tanto la expulsión global de CO₂ disminuye.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

5.1 CONCLUSIONES.

- Se realizó una modelación matemática para el U.C. (Unit Commitment o despacho económico) con restricciones globales: balance de potencia y reserva de potencia; e individuales: límite de generación, tiempos mínimos de salida y de operación, tiempo máximo de operación, variación de toma de carga, disponibilidad de combustible DIESEL, cuota energética de PAUTE y emanación de CO₂; tomando como variables independientes: la disponibilidad de combustible DIESEL, cuota energética de PAUTE y la emanación total de CO₂.
- Para la modelación matemática se empleó una metodología computarizada con una base de datos en EXCEL usando el programa optimizador GAMS, para minimizar el costo total del U.C. El programa resuelve todos los posibles casos de U.C. en barra única dando como resultados la cantidad de combustible DIESEL requerida, la cuota energética total y la aproximación de la emanación total de CO₂. La modelación matemática utilizada no toma en cuenta la red de transmisión ni las interconexiones con Colombia y Perú puesto que no se abordó el tema de flujo de potencia dentro de la programación a corto plazo.
- Los datos de información técnica y económica de las centrales térmicas del sector ecuatoriano utilizados en la base de datos hecha en EXCEL no fueron de fácil acceso, puesto que no se encuentran de forma pública.
- Los coeficientes utilizados para el cálculo de la emanación de CO₂ en la metodología planteada se encuentran desactualizados, ya que se usó datos referenciales obtenidos por el método de tecnologías de los países miembros de la OLADE del año 2004, de acuerdo a la guía SIEN M-5; y, en éste listado no se encuentra el residuo como un combustible energético.
- Al restringir el U.C. (Unit Commitment o despacho económico) de la disponibilidad de combustible DIESEL en 7546 galones (0.764%) y de las emisiones de CO₂ de 5477 toneladas (0.0098%), el costo total del U.C. sube en \$70393 (3.094%) y las emanaciones de CO₂ disminuyen 3 toneladas (0.054%); al restringir de combustible DIESEL en 17546 galones (1.776%) y reducir las

emisiones de CO₂ de 5477 toneladas (0.0091%), el costo total del U.C. sube en \$78637 (3.456%) y las emanaciones de CO₂ disminuyen 4 toneladas (0.073%); empleando datos analizados de acuerdo al despacho económico normal.

- La restricción de la disponibilidad del combustible DIESEL en el U.C. (Unit Commitment o despacho económico) causa; un incremento en el costo total del U.C. de acuerdo a la función: $y = 3070.55 - 0.00083x_1$; donde y es el costo total del U.C. en miles de dólares y, x_1 es la disponibilidad de combustible DIESEL, en galones; y, un aumento de la emanaciones totales de CO₂ de acuerdo a la función: $y = -18971 + 3.88x_2$; donde x_2 es la emisión de CO₂, en toneladas; por lo tanto al disminuir la disponibilidad de combustible en 1000 galones de DIESEL (0.1%), el costo total del U.C. incrementa en \$ 830 (0.033%) y las emanaciones de CO₂ suben 0.21 toneladas (0.0037%).
- Al restringir la cuota energética de PAUTE en el U.C. (Unit Commitment o despacho económico) se obtiene: un aumento en el costo total del U.C. de acuerdo a la función: $y = 4378 - 0.184x_3$; donde y es el costo total del U.C., en miles de dólares; y, x_3 es la cuota hidroeléctrica, en MWh; y, un incremento en la emanación total del CO₂, de acuerdo a la función: $y = -1429 + 0.679x_2$ donde x_2 es la emisión de CO₂ en toneladas; por lo tanto al disminuir la cuota energética en 10 MWh (0.083%), el costo total del U.C. incrementa en \$ 1840 (0.063%) y las emanaciones de CO₂ suben en 2.71 toneladas (0.042%).
- Al disminuir la emanación de CO₂ el costo total del U.C. (Unit Commitment o despacho económico) disminuye de acuerdo a la función: $y = -0.71x_2^2 + 7706.4x_2 - 21057376.8$ para todo $x_2 \in [5461, 5459]$; donde: y es el costo total del U.C., en miles de dólares; y, x_2 es la emisión de CO₂, en toneladas; por lo tanto al reducir 3 toneladas de emisiones de CO₂ (0.054%), el costo total del U.C. disminuye en \$ 15578 (0.664%).

5.2 RECOMENDACIONES.

- A la Carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana se recomienda emplear el modelo desarrollado para el cálculo del despacho económico, en la materia de SEP, como parte de las prácticas de los laboratorios.
- A la Carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana se recomienda proponer otra tesis abriendo el sistema con el flujo de potencia mediante la modelación de transporte tomando en cuenta la red de transmisión del sistema eléctrico ecuatoriano y las interconexiones de Colombia y Perú, para completar la metodología de la selección técnica económica de unidades en la programación a corto plazo. Además, se recomienda mejorar la forma de ingreso y salida de datos de la metodología propuesta para la solución del U.C. (Unit Commitment o despacho económico), y con ello, presentar de una manera más amigable sus resultados numéricos y gráficos.
- Se recomienda al CENCE utilizar la metodología propuesta para la solución del U.C. (Unit Commitment o despacho económico) como herramienta para la toma de decisiones; puesto que se obtiene como resultado la cantidad de combustible DIESEL necesario para la generación térmica, permitiendo realizar una planificación hacia PETROCOMERCIAL de la cantidad de combustible requerido para la programación a corto plazo en barra común.
- Se recomienda al CENACE tener los datos actualizados de información técnica y económica de las centrales térmicas del sector ecuatoriano y que ellos sean de fácil acceso.
- Se recomienda a PETROCOMERCIAL tener actualizada la información de los coeficientes de emisión de CO₂ ,con el método de tecnologías, para los principales combustibles utilizados en la generación térmica del sector ecuatoriano, con una aproximación de tres años, y que esa información esté disponible para realizar consultas públicamente.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Enrique Castillo, Antonio J. Conejo, Pablo Pedregal, Ricardo García y Natalia Alguacil, “Formulación y Resolución de Modelos de Programación Matemática en Ingeniería y Ciencia.” 20 de febrero de 2002.
- [2] <http://www.gams.com>, “Manuales con ejemplos aplicativos. PDF”.
- [3] Richard E. Rosenthal, “GAMS User Guide”, December 1998, GAMS Development Corporation.
- [4] <http://www.institucion.org/mestral/tecnotreball/centraterm.htm>
- [5] www.monografias.com/trabajos33/centrales-termicas/centrales-termicas.shtml
- [6] www.monografias.com/trabajos16/central-termica/central-termica.shtml
- [7] <http://web.ing.puc.cl/~power/alumno06/RealOptions/merc1.html>
- [8] www.infomipyme.com/Docs/GT/Offline/Empresarios
- [9] <http://www.derechoecuador.com>
- [10] <http://www.conelec.gov.ec/normativa>
- [11] <http://www.mitecnologico.com/Main/DiferenciaEntreCostoYGasto>
- [12] <http://web.ing.puc.cl/~power/paperspdf/sepulveda.pdf>
- [13] <http://bieec.epn.edu.ec:8180/dspace/bitstream/123456789/976/6/T10735CAP1.pdf>
- [14] PLAN DE CONTINGENCIA CENACE 2009.
- [15] G. Nina, “Asignación de unidades con restricción de abastecimiento de combustible”, Corporación Centro Nacional de Control de Energía – CENACE.
- [16] John J. Grainger, William D. Stevenson Jr. Análisis de Sistemas de Potencia, McGraw Hill.
- [17] <http://cdigital.dgb.uanl.mx/te/1020119053.pdf>
- [18] Wayne L. Winston, Investigación de Operaciones Aplicación y algoritmos, Cuarta edición.
- [19] NCP – MODELO DE PLANIFICACIÓN DE LA OPERACIÓN ENERGÉTICA DE CORTO PLAZO.

ANEXO 1

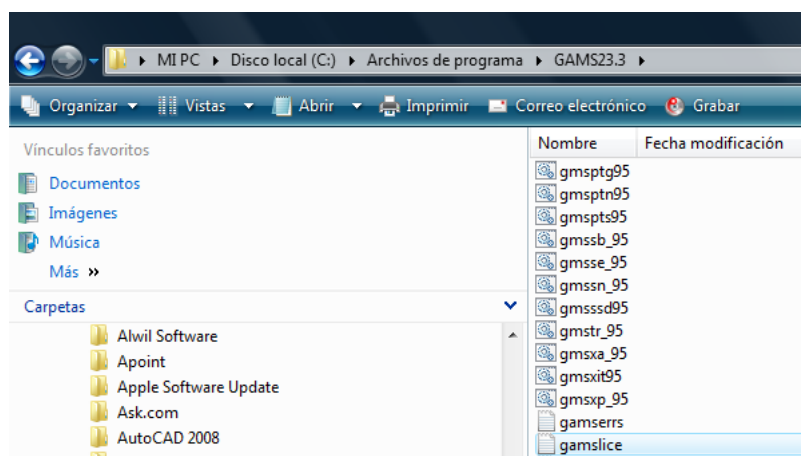
INSTALACIÓN DEL PROGRAMA OPTIMIZADOR GAMS

El programa GAMS es un software desarrollado para la implementación de algoritmos matemáticos, los cuales permiten resolver problemas de optimización; éste programa tiene la ventaja de plantear el lenguaje de modelización en un editor, para posteriormente aplicarle los solvers ó programas de resolución.

Para poder instalar la versión GAMS 23.3 se necesita disponer de un computador con sistema operativo Windows XP o superior, con 40 Mb libres en el disco duro, y se recomienda al menos 32 Mb de memoria RAM para que se puedan ejecutar modelos de programas medios.

En el CD se encuentra el archivo de aplicación (.exe) el cual al ser ejecutado; desarrolla un programa de auto instalación que nos guía a una instalación completa.

Una vez instalado el programa, se debe copiar la licencia para que permita realizar la compilación y ejecución de un mayor número de líneas de programa, y para que los solver se encuentren sin restricciones de uso; la licencia es un archivo de texto (.txt) que se encuentra en el CD con el nombre de gamslice y debe ser copiado dentro de la carpeta donde se instaló el programa que por defecto como se muestra a continuación:



Gráfica 45. Ruta de instalación de la licencia de GAMS.

INSTALACIÓN DE LA BASE DE DATOS PARA LA SELECCIÓN TÉCNICA ECONÓMICA DE UNIDADES TÉRMICAS

Se debe copiar la carpeta “SELTEC” que se encuentra dentro del CD en el disco local C:\ para que pueda utilizar la macros que permite tomar y mostrar datos de la selección técnica económica de unidades termoeléctricas.

Dentro de la dirección “C:\SELTEC\TESIS” se encuentra un archivo en el programa EXCEL con nombre “SELTEC”, el cual contiene los datos técnicos y operativos de las centrales térmicas clasificadas de acuerdo al tipo de combustible que utilizan para la generación; la base de datos y el menú principal se encuentran en la pestaña “GEN” como se puede apreciar en la siguiente gráfica:

DATOS DE INGRESO

CUOTA HIDRAULICA

15000

DISPONIBILIDAD DIESEL

650000

EMISION CO2

6500

CARGAR DATOS

UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA

FACULTAD DE INGENIERIAS

CARRERA ELECTRICA

SEL-TEC

GAMS

Solver: CPLEX

Ecuaciones: 23393 Variables: 4054

Costo Total(\$): 1721586

Emissiones de CO2(Ton): 4317

Cuota Total(MW): 15876

Disponibilidad DIESEL(Gal): 633858

APLICAR SOLVER

GRAFICAS

SOLUCION

DESPACHO

EMISIONES

% DE EMISIONES

No DE CENTRAL	EMPRESA	UNIDAD	TIPO DE COMBUSTIBLE	TIPO DE UNIDAD	PMAX (MW)	PMIN (MW)	LRS (MW/h)	LRV (MW/h)	CA (\$)	CV (\$/MWh)	REND (MWh/Gal)	MDT (HORAS)	MUT (HORAS)	
120	GENEROCA	ROCAFUERTE 5	FUEL-OIL	MOTOR DE COMBUSTION	8	4.20	3.50	37.50	45.00	0.00	57.03	0.0151000	0.25	0.00
120	GENEROCA	ROCAFUERTE 6	FUEL-OIL	MOTOR DE COMBUSTION	9	4.20	3.50	37.50	45.00	0.00	57.03	0.0151000	0.25	0.00
120	GENEROCA	ROCAFUERTE 7	FUEL-OIL	MOTOR DE COMBUSTION	10	4.20	3.50	37.50	45.00	0.00	57.03	0.0151000	0.25	0.00
120	GENEROCA	ROCAFUERTE 8	FUEL-OIL	MOTOR DE COMBUSTION	11	4.20	3.50	37.50	45.00	0.00	57.03	0.0151000	0.25	0.00
1	TERMOESMERALDAS	ESMERALDAS	RESIDUO	VAPOR	12	130.00	65.00	75.00	90.00	20354.00	29.65	0.0157800	24.00	720.00
2	TERMOPICHINCHA	GUANGOPOLLO 1	RESIDUO	MOTOR DE COMBUSTION	13	5.10	5.00	11.25	11.25	250.00	46.56	0.0170000	6.00	6.00
3	TERMOPICHINCHA	GUANGOPOLLO 2	RESIDUO	MOTOR DE COMBUSTION	14	5.10	5.00	11.25	11.25	250.00	38.90	0.0169500	6.00	6.00
4	TERMOPICHINCHA	GUANGOPOLLO 3	RESIDUO	MOTOR DE COMBUSTION	15	5.10	5.00	11.25	11.25	250.00	46.67	0.0170000	6.00	6.00

GEN

POT

GAMS

REPORT

DATOS

UC HORARIO

EMI HOR

\$ EMI TOT

Gráfica 46. Presentación del menú principal y la base de datos.

USO DE LA MACRO PARA LA SOLUCIÓN DE LA SELECCIÓN TÉCNICA ECONÓMICA DE UNIDADES TÉRMICAS

Para poder encontrar la solución del problema planteado se deben seguir los siguientes pasos:

1. Se debe modificar los datos de ingreso los cuales son que se encuentran en la pestaña “GEN” del archivo SELTEC.xls:

- Cuota hidroeléctrica.- Se modifica la cuota hidráulica de la central Paute, para poder simular estiaje.
- Disponibilidad de combustible.- Se restringe el abastecimiento de combustible Diesel para las centrales que utilicen dicho carburante.
- Emisión de CO₂.- Se pone un límite máximo de emisión de dióxido de carbono dentro del sistema.

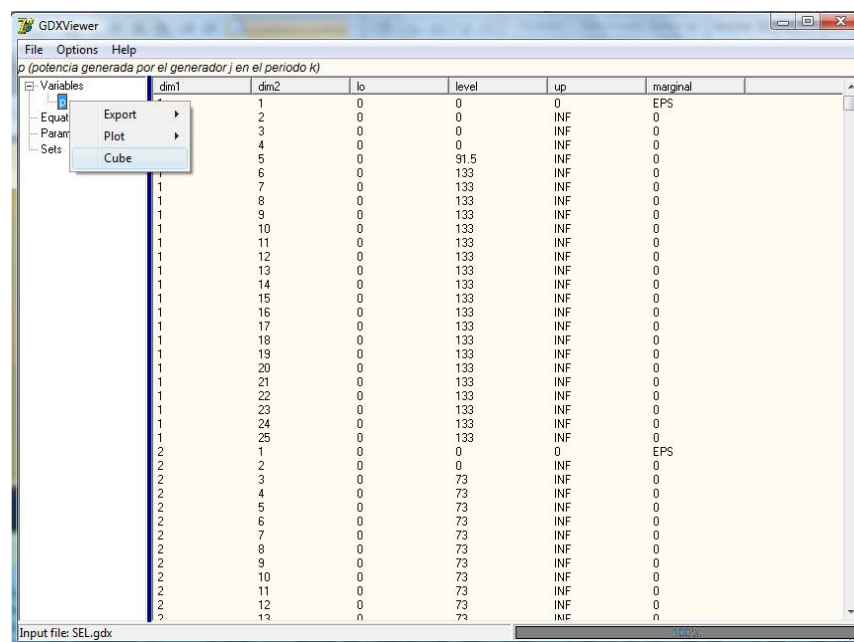
Una vez modificados los datos se pulsa el botón “CARGAR DATOS” para que los datos queden memorizados dentro de la base de las centrales térmicas.

NOTA.- Si el programa de EXCEL muestra un cuadro de dialogo donde menciona reemplazar el archivo existente, se debe aceptar.

2. Luego se presiona el botón “APLICAR SOLVER” para realizar la interfaz hacia el programa GAMS, el cual toma los valores de las centrales que se encuentran en la base de datos para aplicar el modelo matemático y resolverlo mediante un solver llamado CPLEX.

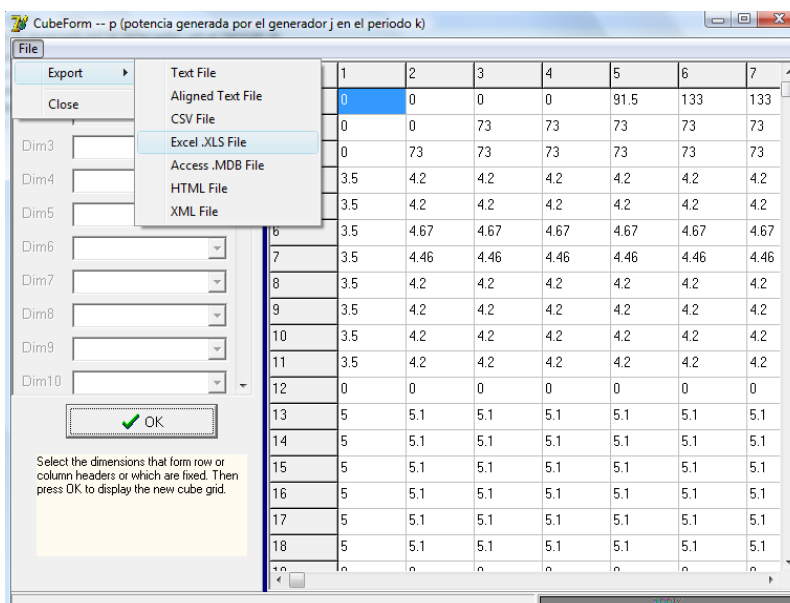
La solución se obtiene por medio de una aplicación de GAMS llamada GDXVIEWER, la misma que presenta la variable de salida “p” que es la potencia horaria de cada una de las centrales inmiscuidas en el problema.

Para obtener los valores de una manera matricial, se hace clic derecho sobre la variable “p” y en la pestaña que aparece de manera contigua se selecciona “Cube” como se muestra en la siguiente gráfica.



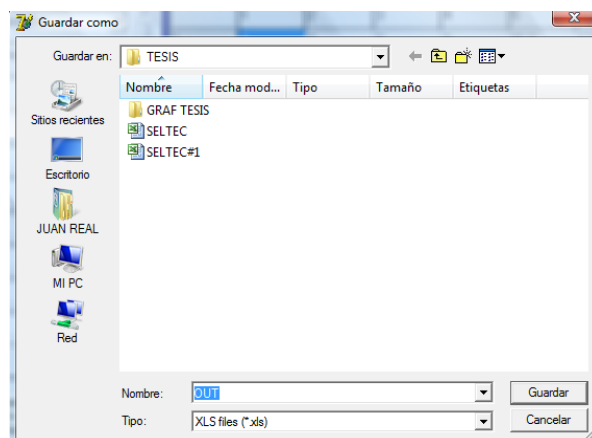
Gráfica 47. Aplicación GDXVIEWER.

Seguidamente aparece una nueva pantalla llamada “CubeForm”, en la cual se puede visualizar los datos de potencias en filas y columnas enumeradas; y para que los datos sean exportados hacia EXCEL, se selecciona dentro del menú “File” el submenú “Export” y en la ventana que se encuentra contigua se escoge “EXCEL .XLS File” como se indica de manera seguida.



Gráfica 48. Exportar la variable “p” hacia EXCEL

De manera seguida se debe guardar con el nombre “OUT” dentro de la carpeta donde se encuentra la base de datos (C:\SELTEC\TESIS) y se acepta, lo citado se puede mirar a continuación.



Gráfica 49. Guardar la salida de datos.

No se debe abrir en ese momento el archivo generado y se debe cerrar la aplicación GDXVIEWER.

NOTA.- Es de suma importancia borrar todos los archivos que tengan el nombre “OUT.xls” que se encuentren en la dirección C:\SELTEC\TESIS cada vez que se realiza la corrida del programa, puesto que esto ocasiona conflictos en la toma de datos para el siguiente paso:

3. Para poder realizar la adquisición de datos se debe abrir el archivo creado “OUT.xls” que se encuentren en la dirección C:\SELTEC\TESIS, luego regresar al archivo “SELTEC.xls” y en la pestaña “GEN” presionar el botón “SOLUCION” para poder realizar la toma de datos y encontrar los valores de potencia y emisiones de CO₂ horarias y totales clasificadas de acuerdo al tipo de combustible.

Los datos de la solución del programa se encuentran dentro de la pestaña “DATOS” del archivo “SELTEC.xls” divididos de acuerdo al tipo de combustible utilizado para la generación eléctrica.

4. Una vez obtenidos los datos, en la pestaña principal “GEN” podemos obtener los gráficos más relevantes para el caso de estudio como son:

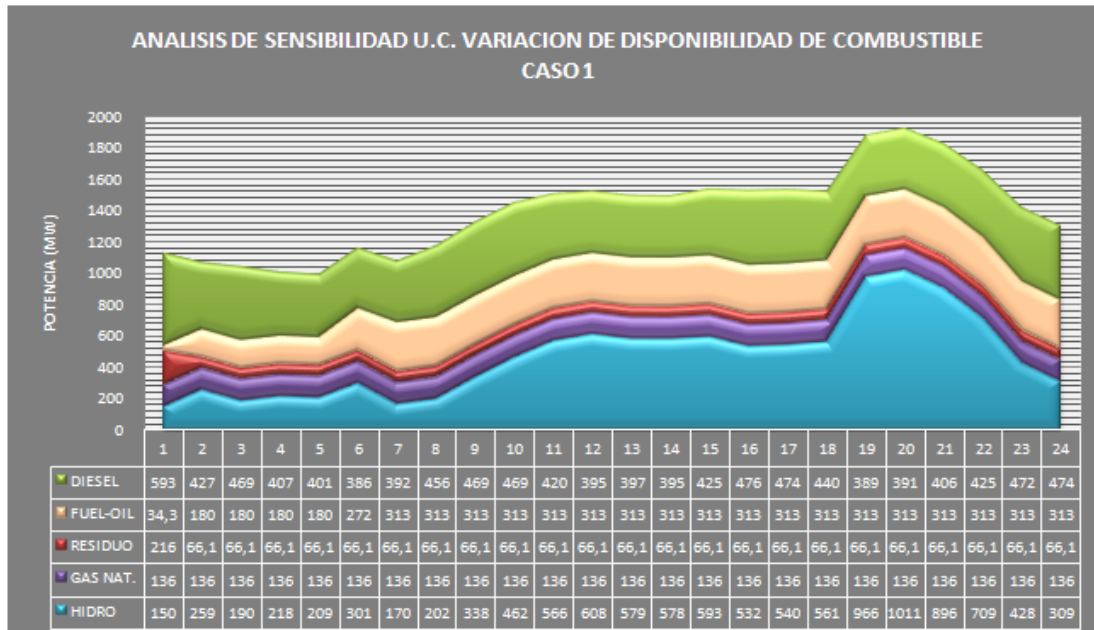
- Presionando el botón “DESPACHO” se obtiene una gráfica en áreas de las potencias entregadas horariamente por las centrales divididas según el tipo de combustible usado para la generación y se puede apreciar el cumplimiento de la demanda pronosticada.
- Presionando el botón “EMISIONES” se obtiene la gráfica en barras de las emisiones de dióxido de carbono de manera horaria que emiten las centrales termoeléctricas de igual forma clasificadas de acuerdo al tipo de combustible usado para la generación.
- Y por último presionando el botón “% DE EMISIONES” se muestra de manera global y porcentual las emisiones de dióxido de carbono que produce la selección técnica económica de unidades generadoras que se encuentran en la base de datos.

NOTA.- Si al seleccionar las gráficas el programa de EXCEL muestra un cuadro de diálogo donde pregunta que el rango seleccionado para el gráfico no es correcto, solo presionar aceptar.

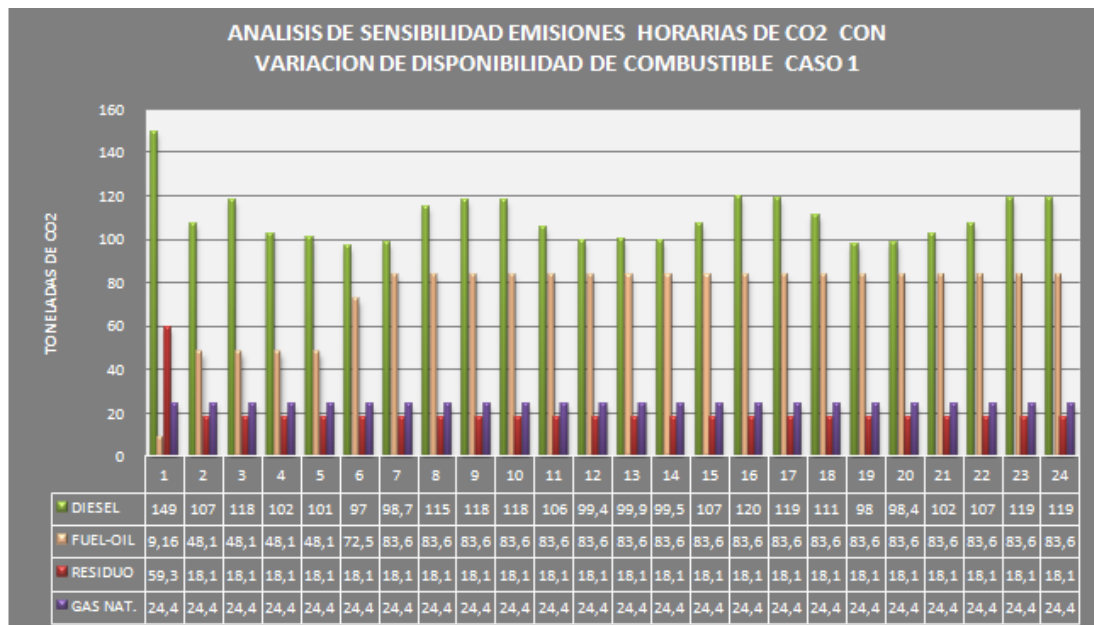
Es de suma importancia seguir los pasos mencionados para la obtención de la solución del problema de selección técnica económica de unidades termoeléctricas, puesto que al no seguir adecuadamente las instrucciones corre el riesgo de que el depurador de la macro no logre finalizar las acciones impuestas para una correcta solución.

ANEXO 2

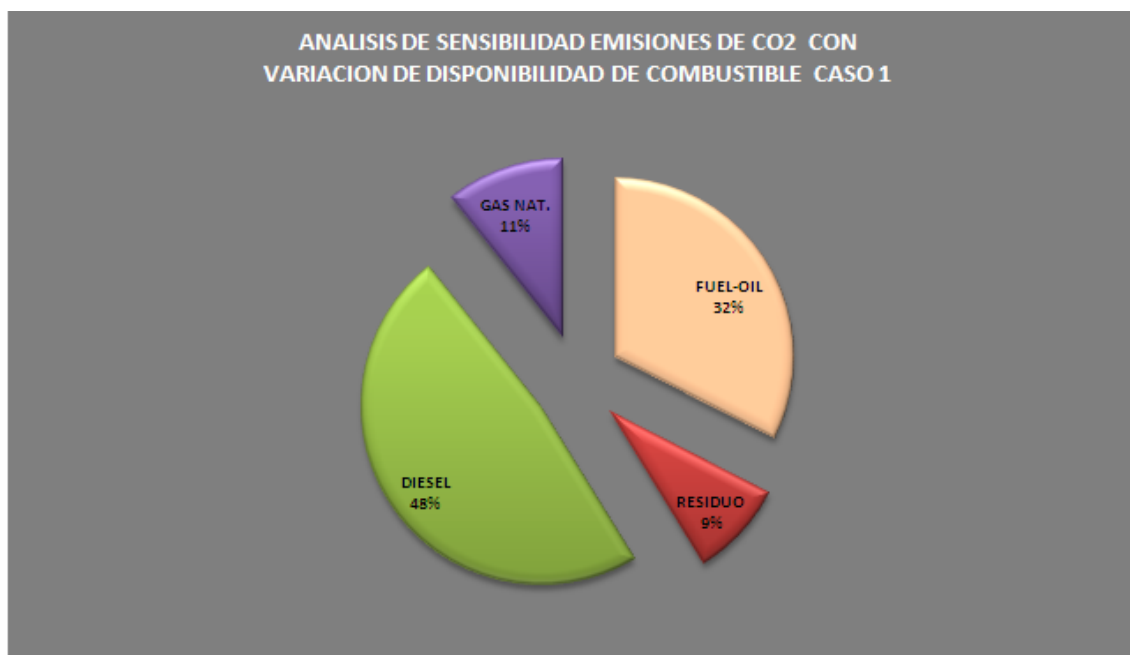
ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD ANTE LA DISPONIBILIDAD DE COMBUSTIBLE DIESEL



Gráfica 50. Selección Técnica económica de unidades de acuerdo al tipo de combustible, Sensibilidad ante la disponibilidad de combustible, Caso 1.



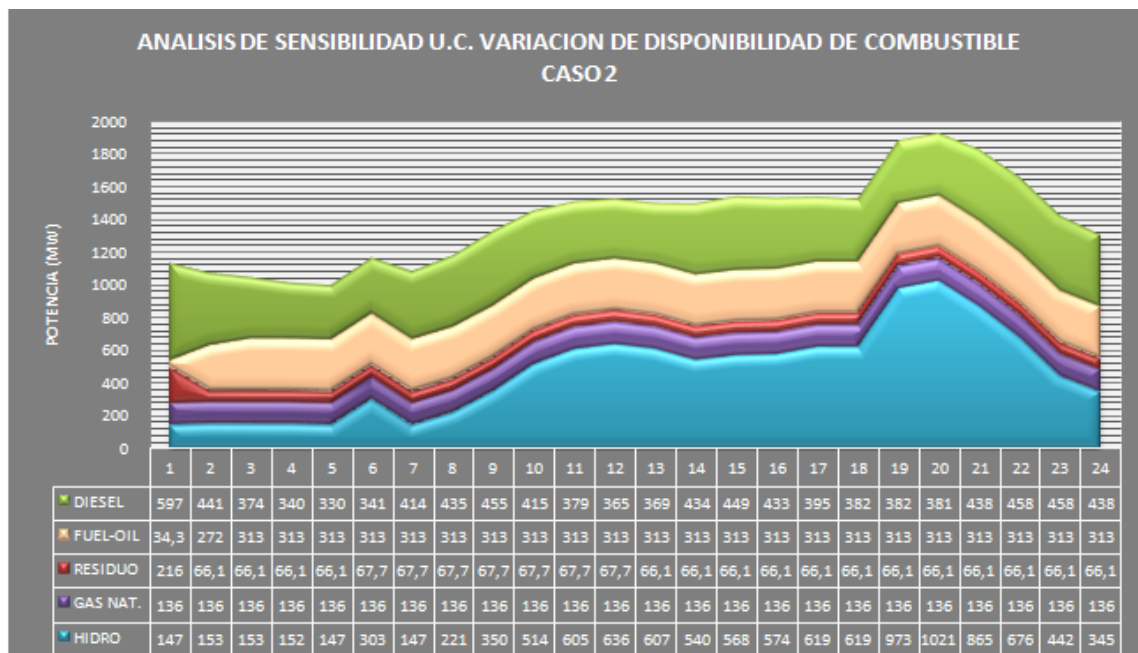
Gráfica 51. Emisiones de CO₂ horarias por tipo de combustible, Sensibilidad ante la disponibilidad de combustible, Caso 1.



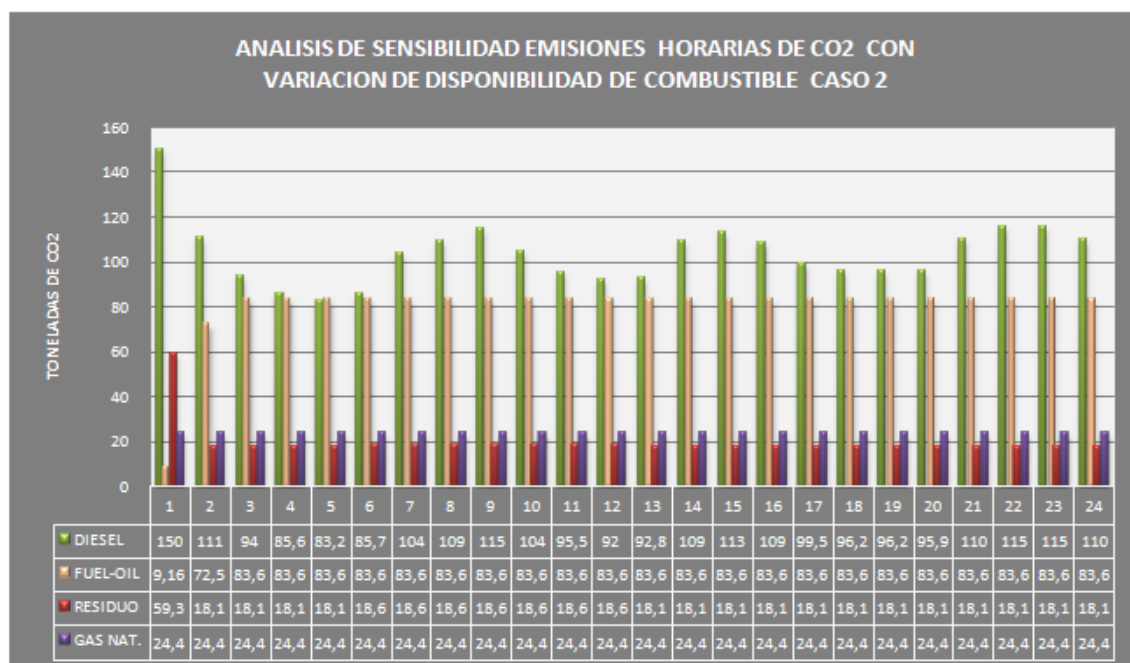
Gráfica 52. Porcentaje de emisiones de CO₂ totales, Sensibilidad ante la disponibilidad de combustible, Caso 1.

TIPO DE COMBUSTIBLE	TOTAL DE EMISIONES EN TON. CO ₂
DIESEL	2629.23
FUEL-OÍL	1778.48
RESIDUO	476.41
GAS NATURAL	585.106
EMISIÓN TOTAL DE CO₂	5469.247

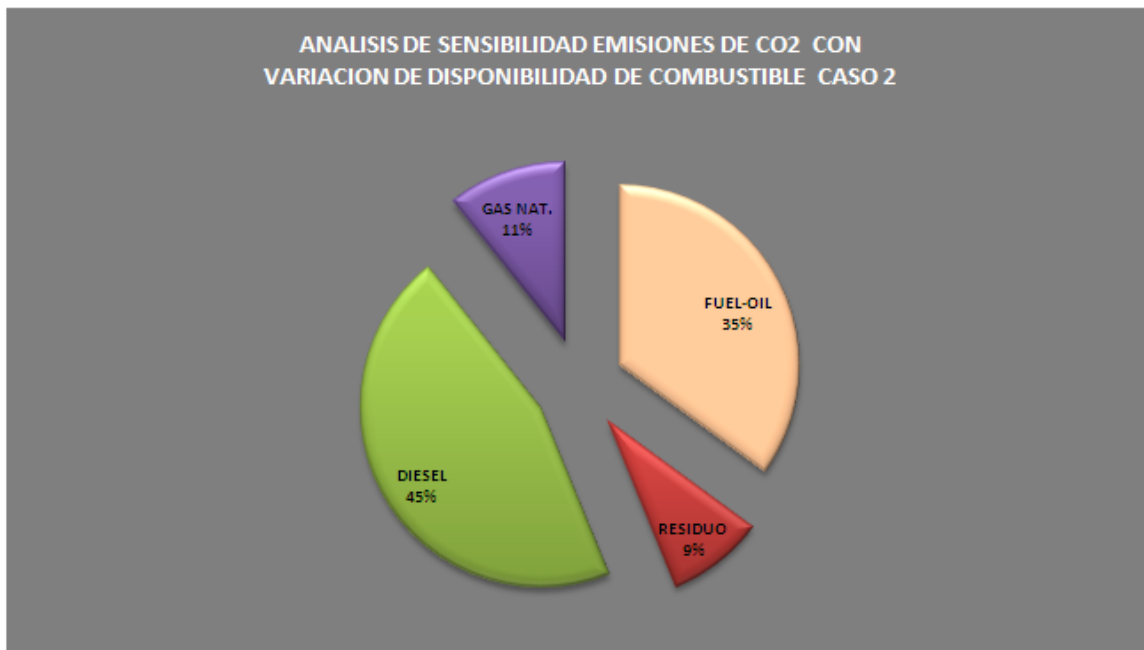
Tabla 20. Total de emisiones de CO₂ por tipo de combustible, Sensibilidad ante la disponibilidad de combustible, Caso 1.



Gráfica 53. Selección Técnica económica de unidades de acuerdo al tipo de combustible, Sensibilidad ante la disponibilidad de combustible, Caso 2.



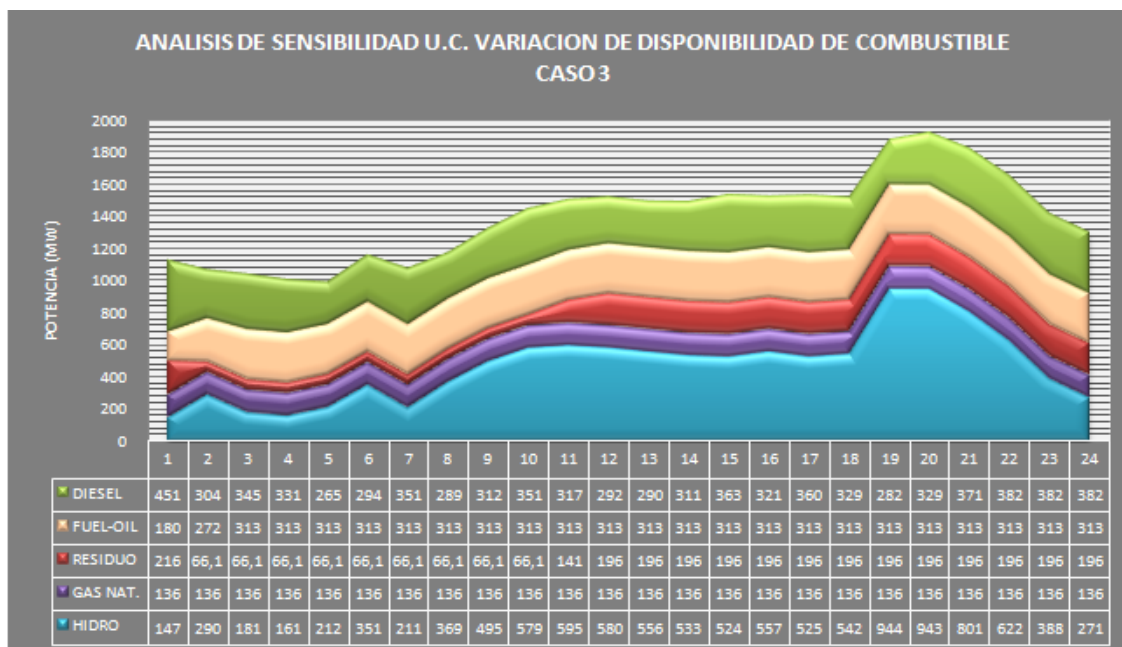
Gráfica 54. Emisiones de CO₂ horarias por tipo de combustible, Sensibilidad ante la disponibilidad de combustible, Caso 2.



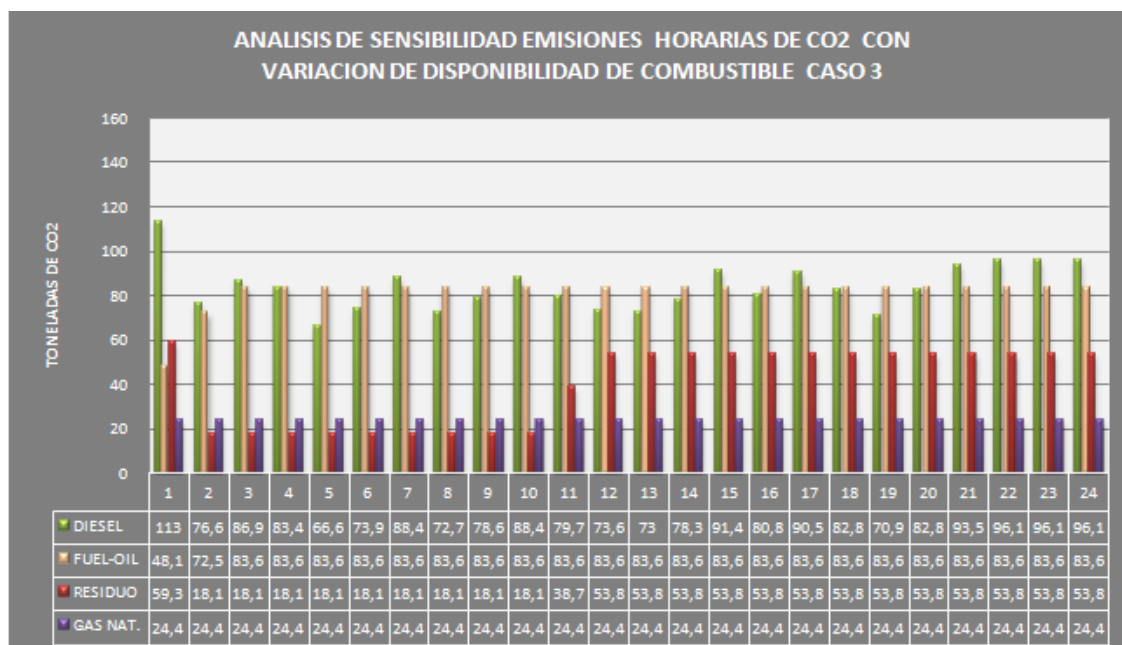
Gráfica 55. Porcentaje de emisiones de CO2 totales, Sensibilidad ante la disponibilidad de combustible, Caso 2.

TIPO DE COMBUSTIBLE	TOTAL DE EMISIONES EN TON. CO ₂
DIESEL	2492.51
FUEL-OÍL	1920.39
RESIDUO	479.49
GAS NATURAL	585.106
EMISIÓN TOTAL DE CO₂	5477.511

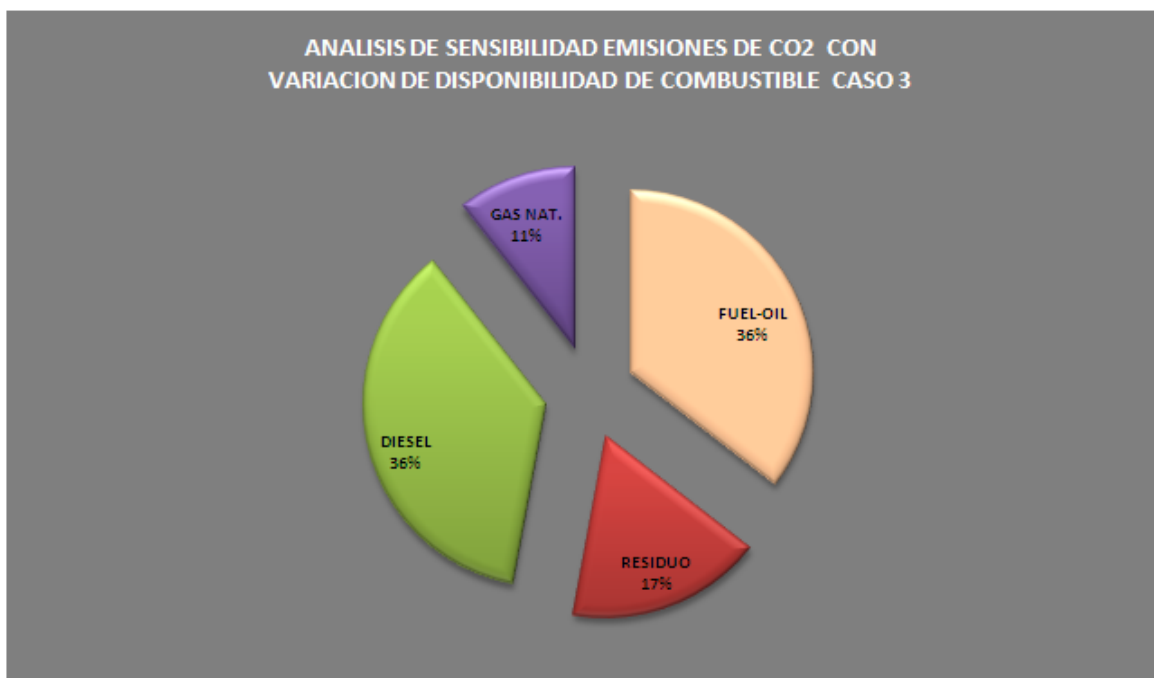
Tabla 21. Total de emisiones de CO2 por tipo de combustible, Sensibilidad ante la disponibilidad de combustible, Caso 2.



Gráfica 56. Selección Técnica económica de unidades de acuerdo al tipo de combustible, Sensibilidad ante la disponibilidad de combustible, Caso 3.



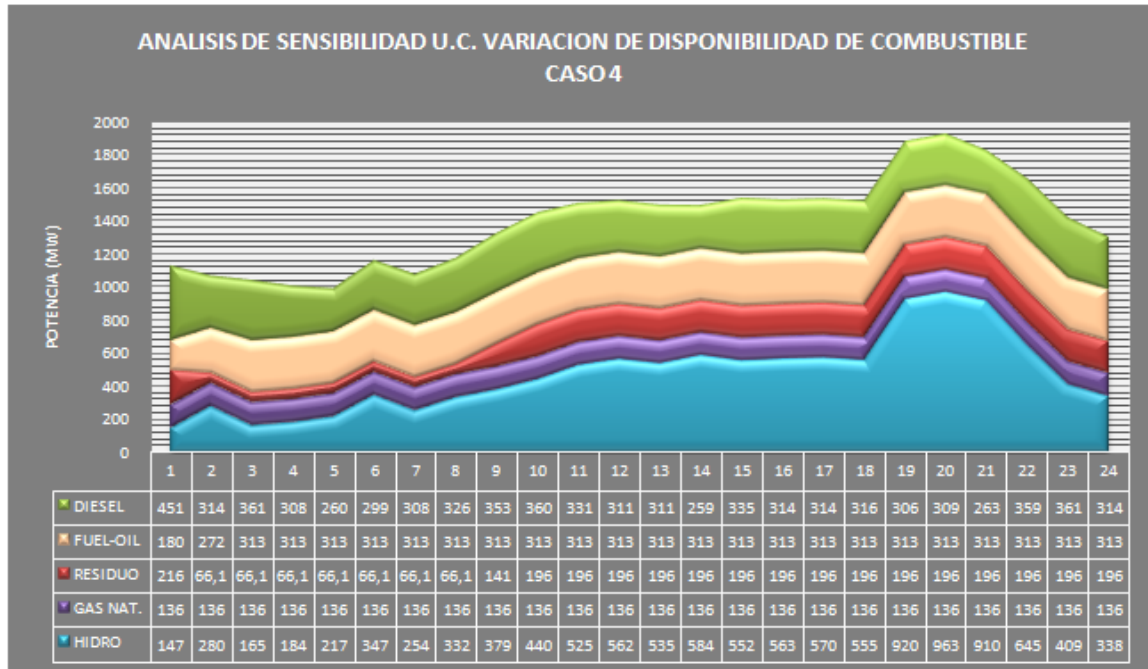
Gráfica 57. Emisiones de CO2 horarias por tipo de combustible, Sensibilidad ante la disponibilidad de combustible, Caso 3.



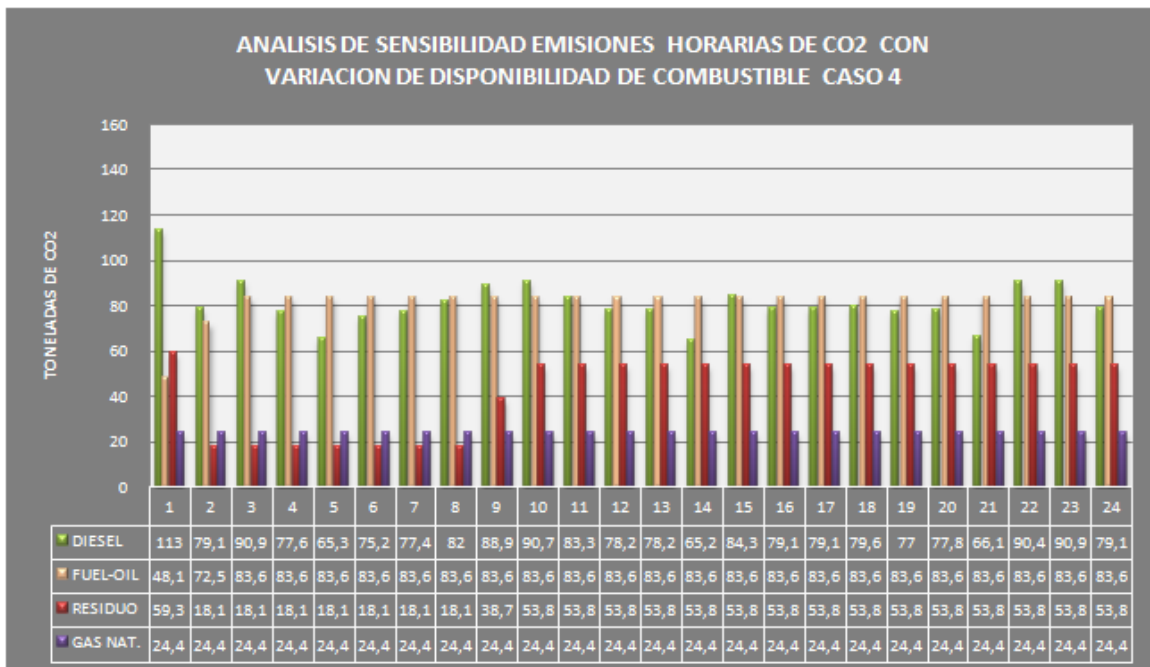
Gráfica 58. Porcentaje de emisiones de CO₂ totales, Sensibilidad ante la disponibilidad de combustible, Caso 3.

TIPO DE COMBUSTIBLE	TOTAL DE EMISIONES EN TON. CO ₂
DIESEL	2014.36
FUEL-OÍL	1959.33
RESIDUO	960.68
GAS NATURAL	585.106
EMISIÓN TOTAL DE CO₂	5519.493

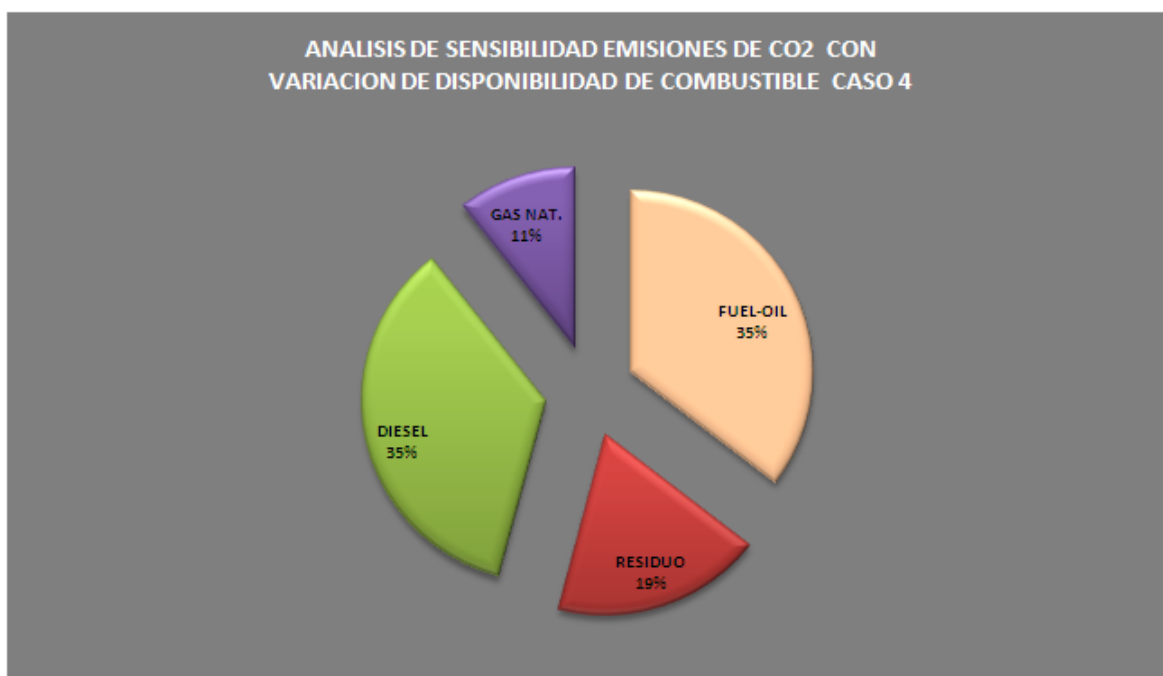
Tabla 22. Total de emisiones de CO₂ por tipo de combustible, Sensibilidad ante la disponibilidad de combustible, Caso 3.



Gráfica 59. Selección Técnica económica de unidades de acuerdo al tipo de combustible, Sensibilidad ante la disponibilidad de combustible, Caso 4.



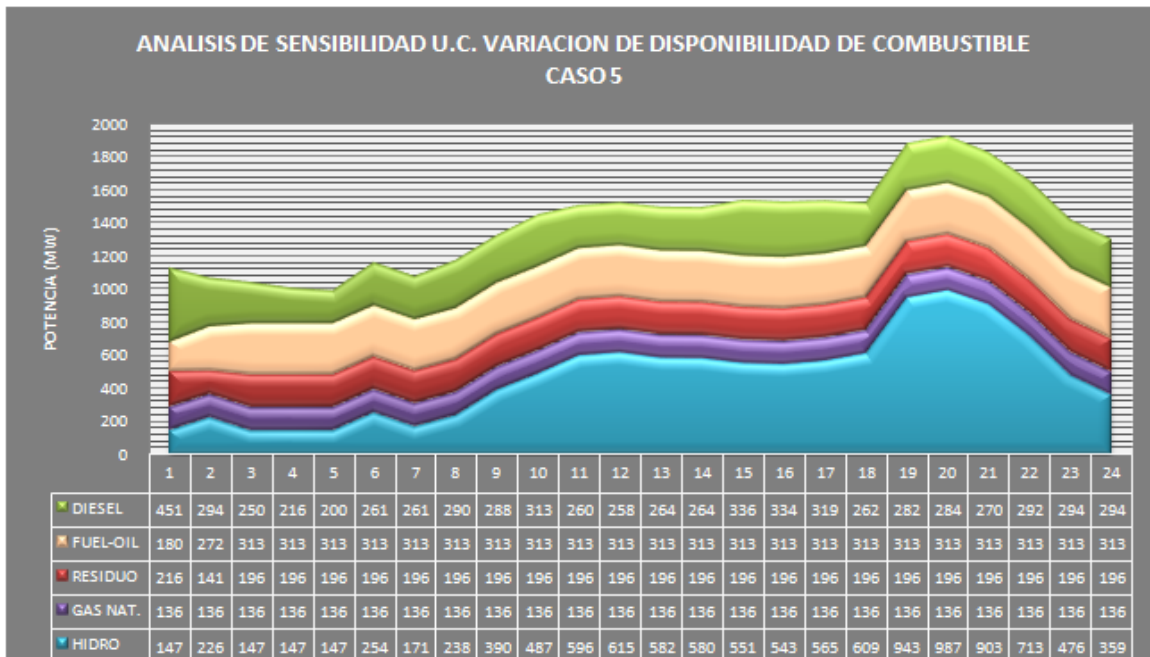
Gráfica 60. Emisiones de CO₂ horarias por tipo de combustible, Sensibilidad ante la disponibilidad de combustible, Caso 4.



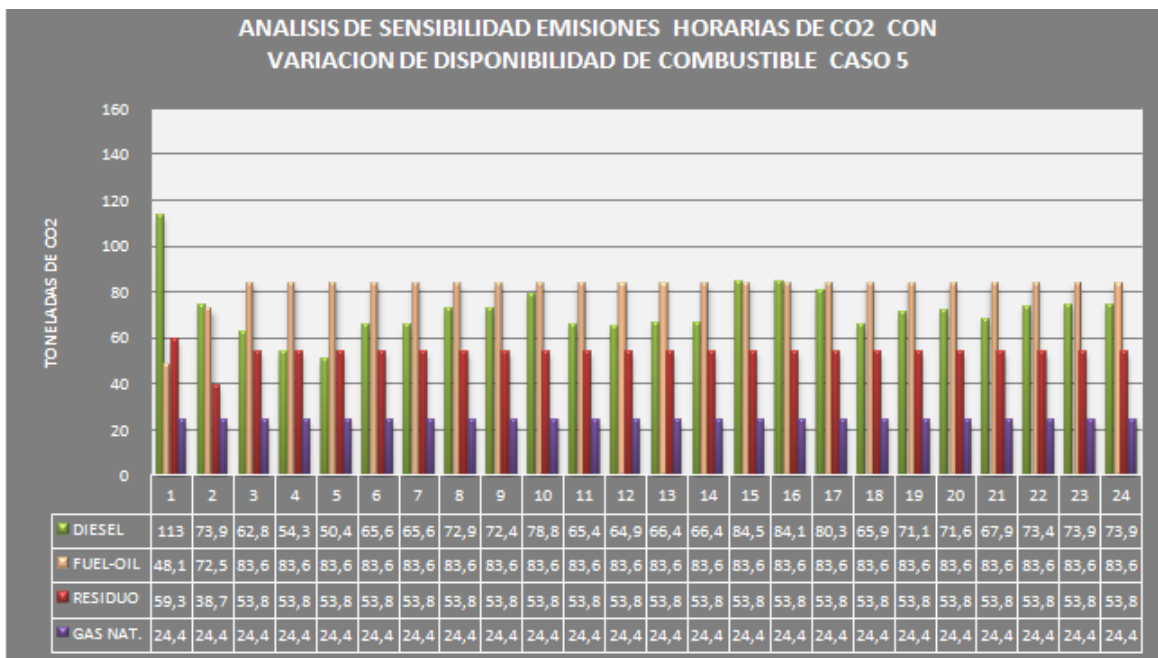
Gráfica 61. Porcentaje de emisiones de CO₂ totales, Sensibilidad ante la disponibilidad de combustible, Caso Cuatro.

TIPO DE COMBUSTIBLE	TOTAL DE EMISIONES EN TON. CO ₂
DIESEL	1948.92
FUEL-OÍL	1959.33
RESIDUO	1032.019
GAS NATURAL	585.106
EMISIÓN TOTAL DE CO₂	5525.391

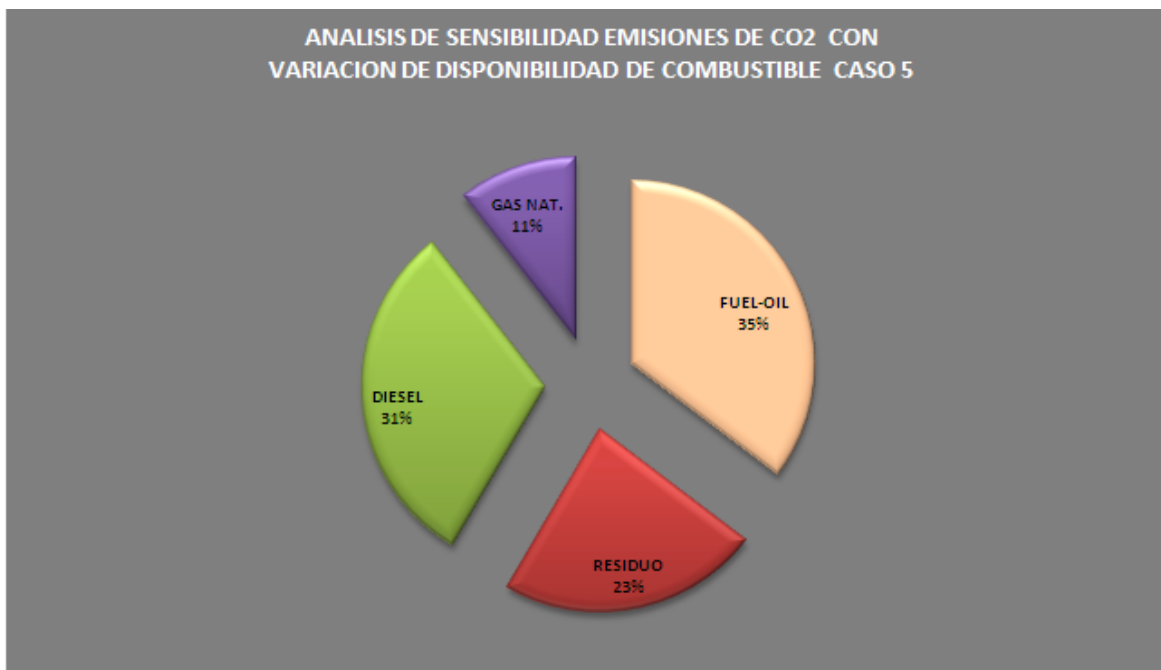
Tabla 23. Total de emisiones de CO₂ por tipo de combustible, Sensibilidad ante la disponibilidad de combustible, Caso 4.



Gráfica 62. Selección Técnica económica de unidades de acuerdo al tipo de combustible, Sensibilidad ante la disponibilidad de combustible, Caso 5.



Gráfica 63. Emisiones de CO₂ horarias por tipo de combustible, Sensibilidad ante la disponibilidad de combustible, Caso 5.



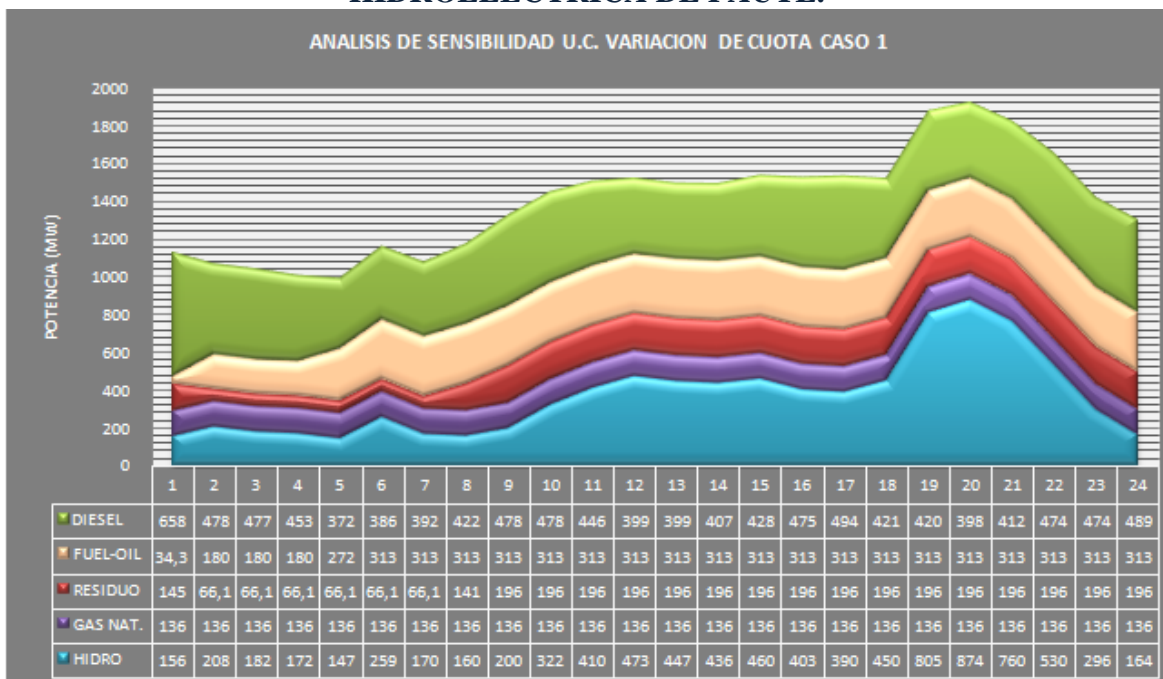
Gráfica 64. Porcentaje de emisiones de CO2 totales, Sensibilidad ante la disponibilidad de combustible, Caso 5.

TIPO DE COMBUSTIBLE	TOTAL DE EMISIONES EN TON. CO ₂
DIESEL	1719.89
FUEL-OÍL	1959.33
RESIDUO	1281.69
GAS NATURAL	585.106
EMISIÓN TOTAL DE CO₂	5546.033

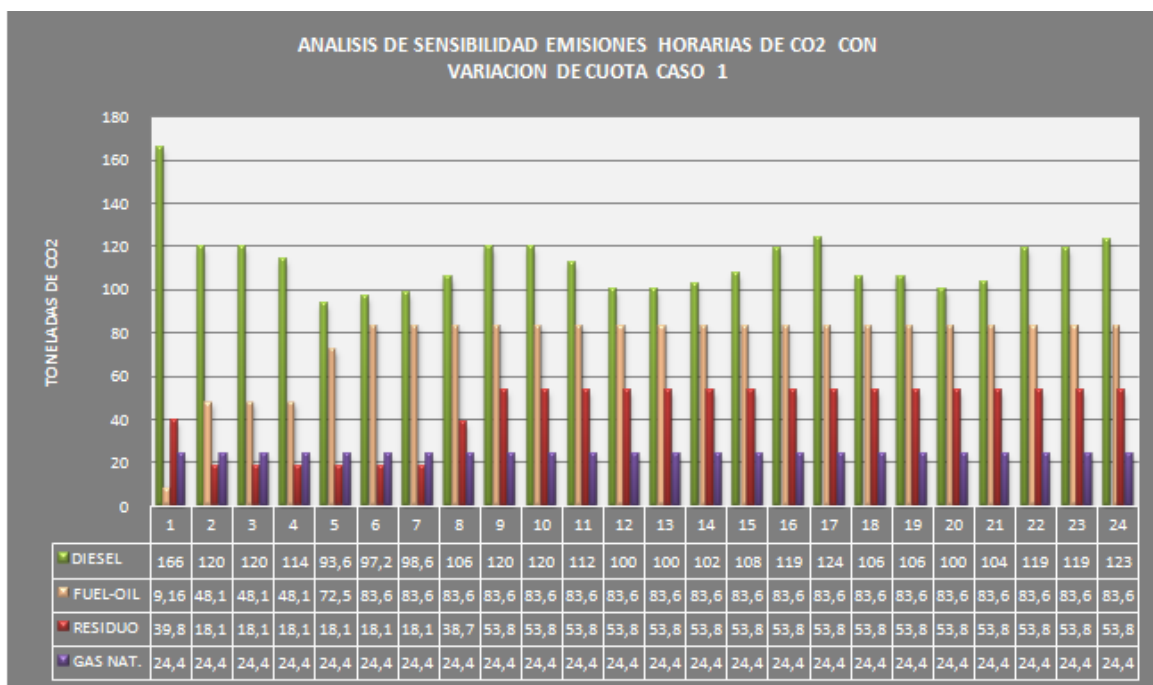
Tabla 24. Total de emisiones de CO₂ por tipo de combustible, Sensibilidad ante la disponibilidad de combustible, Caso 5.

ANEXO 3

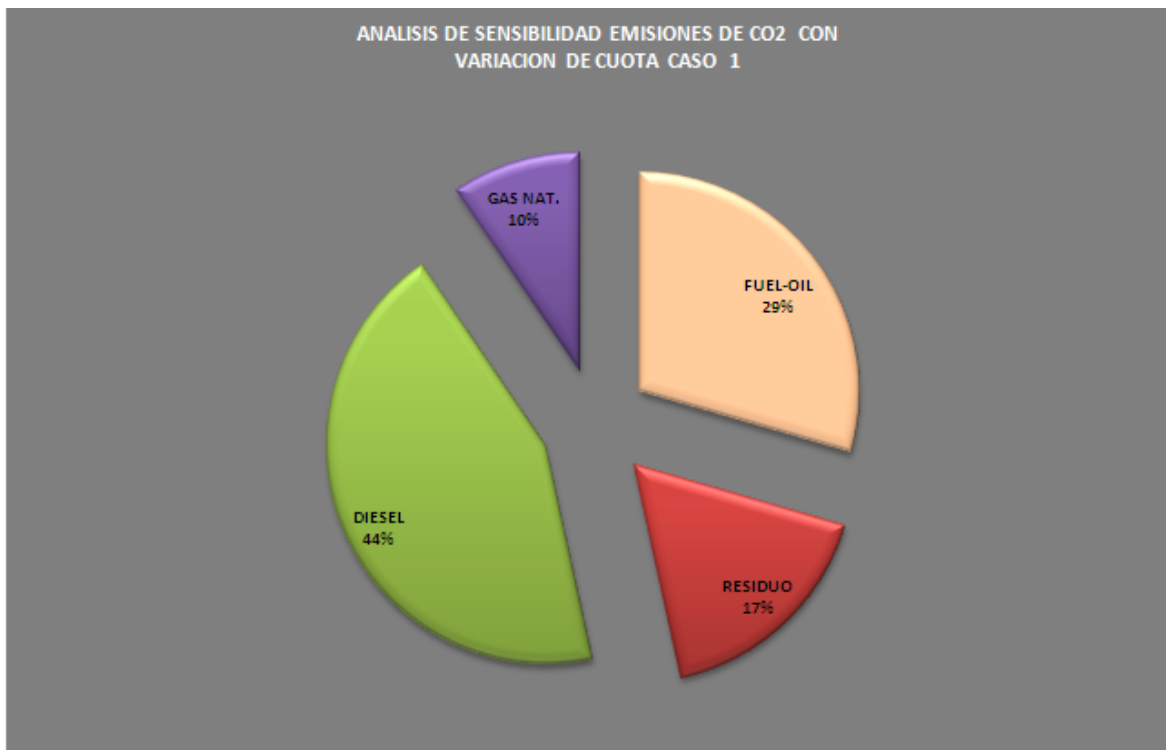
ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD ANTE LA VARIACIÓN DE LA CUOTA HIDROELÉCTRICA DE PAUTE.



Gráfica 65. Selección Técnica económica de unidades de acuerdo al tipo de combustible, Sensibilidad ante la cuota hidráulica, Caso 1.



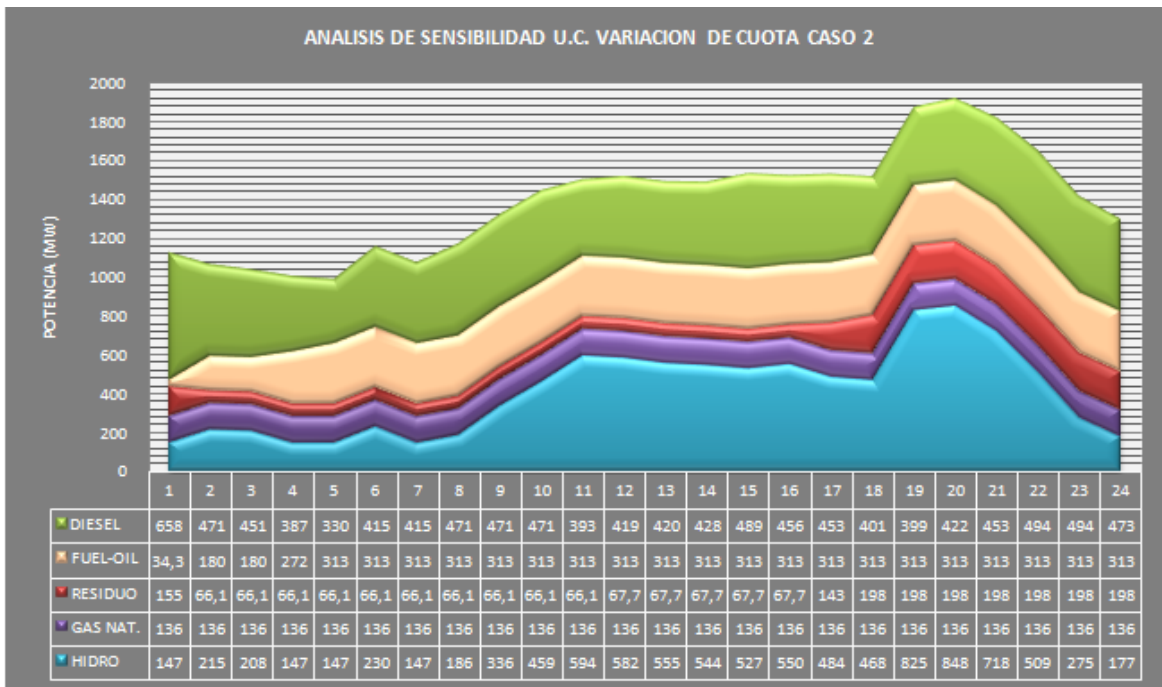
Gráfica 66. Emisiones de CO₂ horarias por tipo de combustible, Sensibilidad ante la cuota hidráulica, Caso 1.



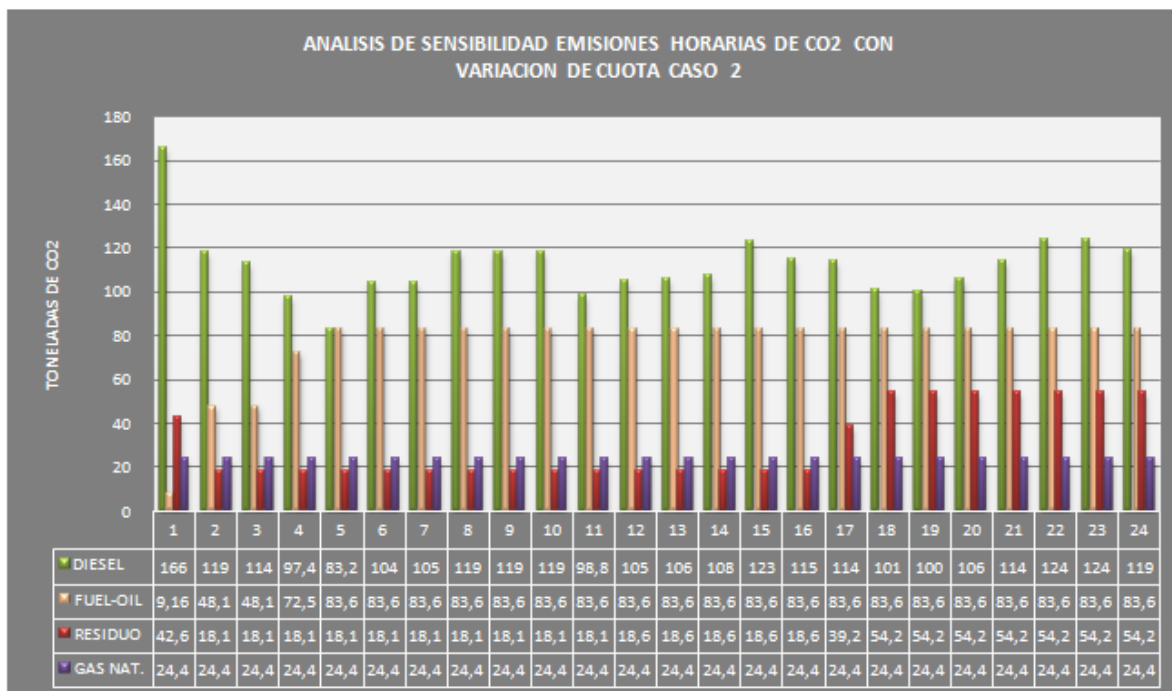
Gráfica 67. Porcentaje de emisiones de CO2 totales, Sensibilidad ante la cuota hidráulica, Caso 1.

TIPO DE COMBUSTIBLE	TOTAL DE EMISIONES EN TON. CO ₂
DIESEL	2700.51
FUEL-OÍL	1813.96
RESIDUO	1048.15
GAS NATURAL	585.106
EMISIÓN TOTAL DE CO₂	6147.73

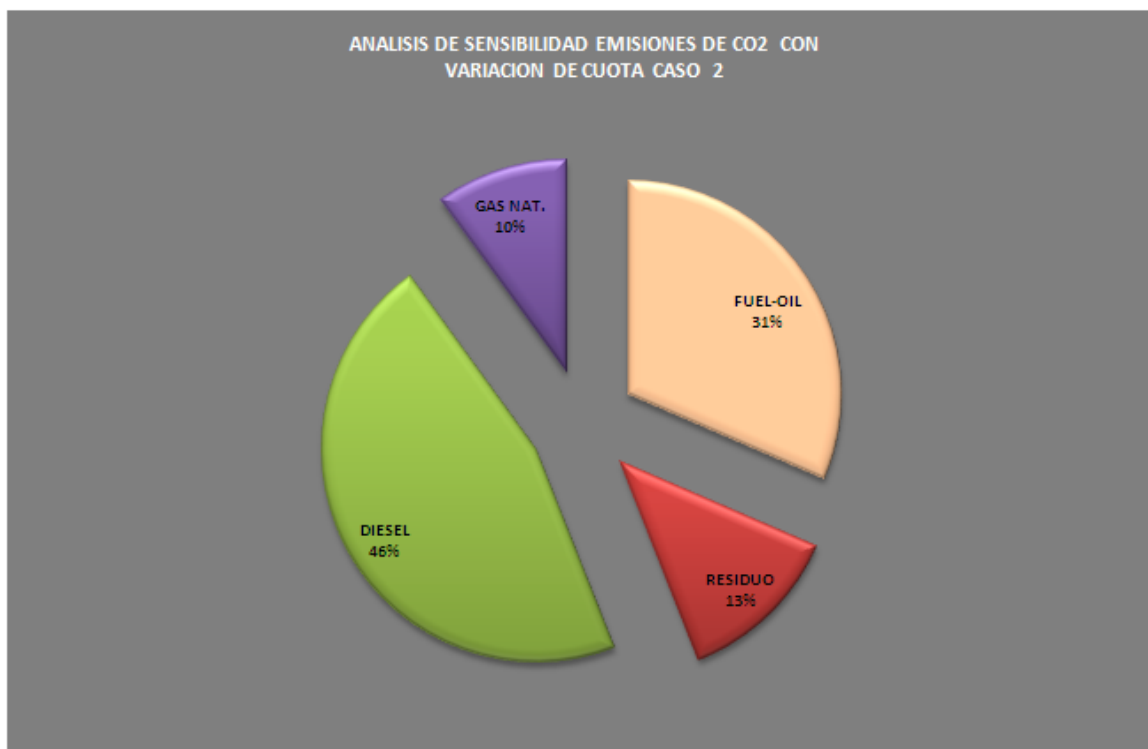
Tabla 25. Total de emisiones de CO₂ por tipo de combustible, Sensibilidad ante la cuota hidráulica, Caso 1.



Gráfica 68. Selección Técnica económica de unidades de acuerdo al tipo de combustible, Sensibilidad ante la cuota hidráulica, Caso 2.



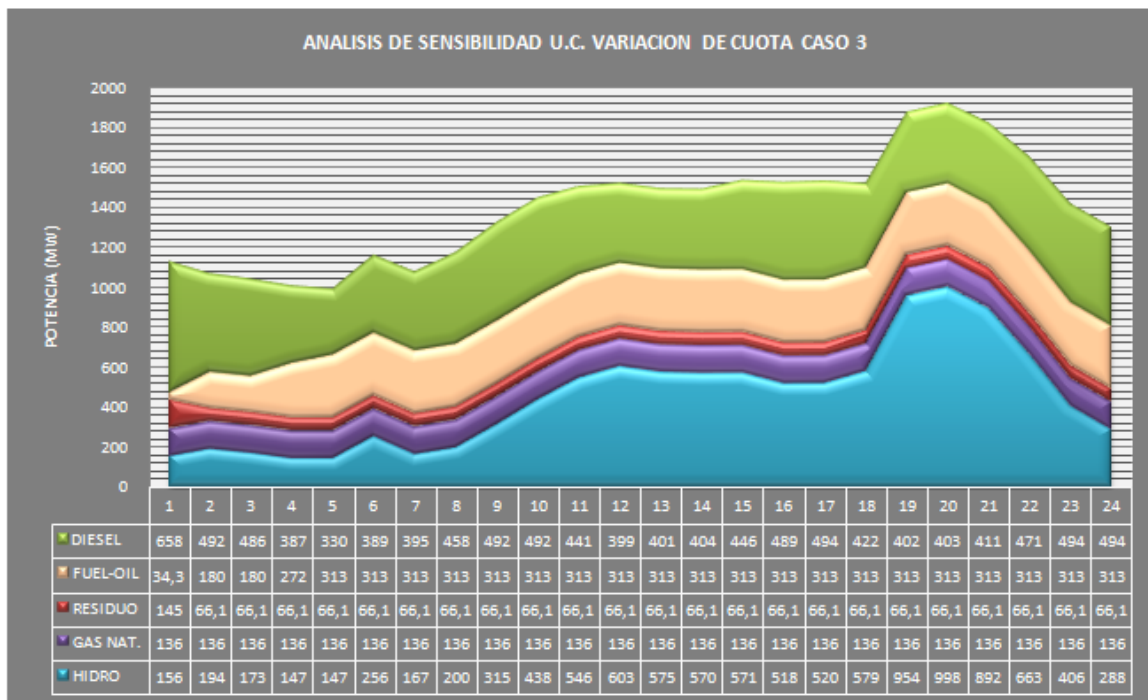
Gráfica 69. Emisiones de CO₂ horarias por tipo de combustible, Sensibilidad ante la cuota hidráulica, Caso 2.



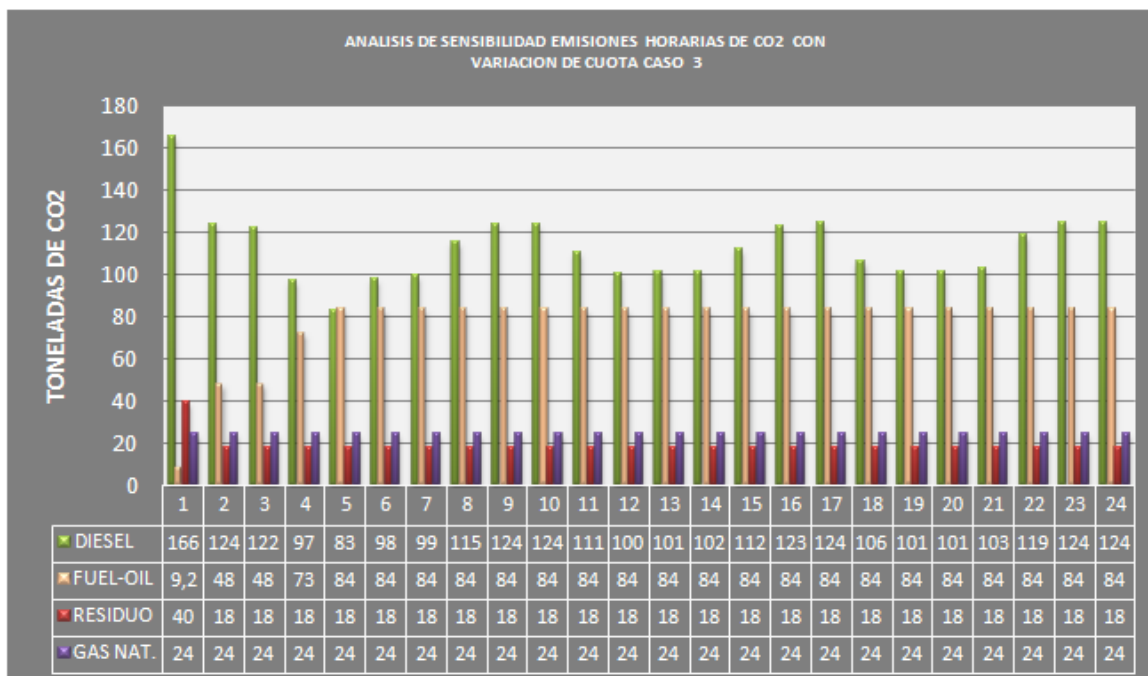
Gráfica 70. Porcentaje de emisiones de CO₂ totales, Sensibilidad ante la cuota hidráulica, Caso 2.

TIPO DE COMBUSTIBLE	TOTAL DE EMISIONES EN TON. CO ₂
DIESEL	2701.97
FUEL-OÍL	1849.44
RESIDUO	735.69
GAS NATURAL	585.106
EMISIÓN TOTAL DE CO₂	5872.21

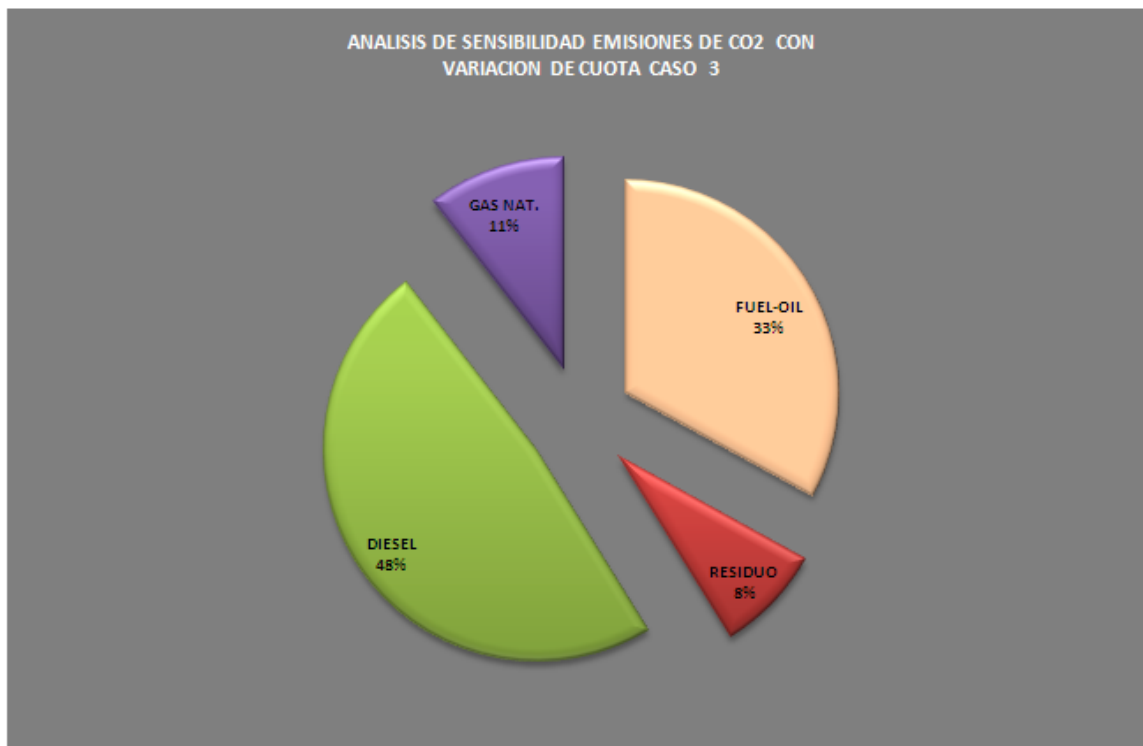
Tabla 26. Total de emisiones de CO₂ por tipo de combustible, Sensibilidad ante la cuota hidráulica, Caso 2.



Gráfica 71. Selección Técnica económica de unidades de acuerdo al tipo de combustible, Sensibilidad ante la cuota hidráulica, Caso 3.



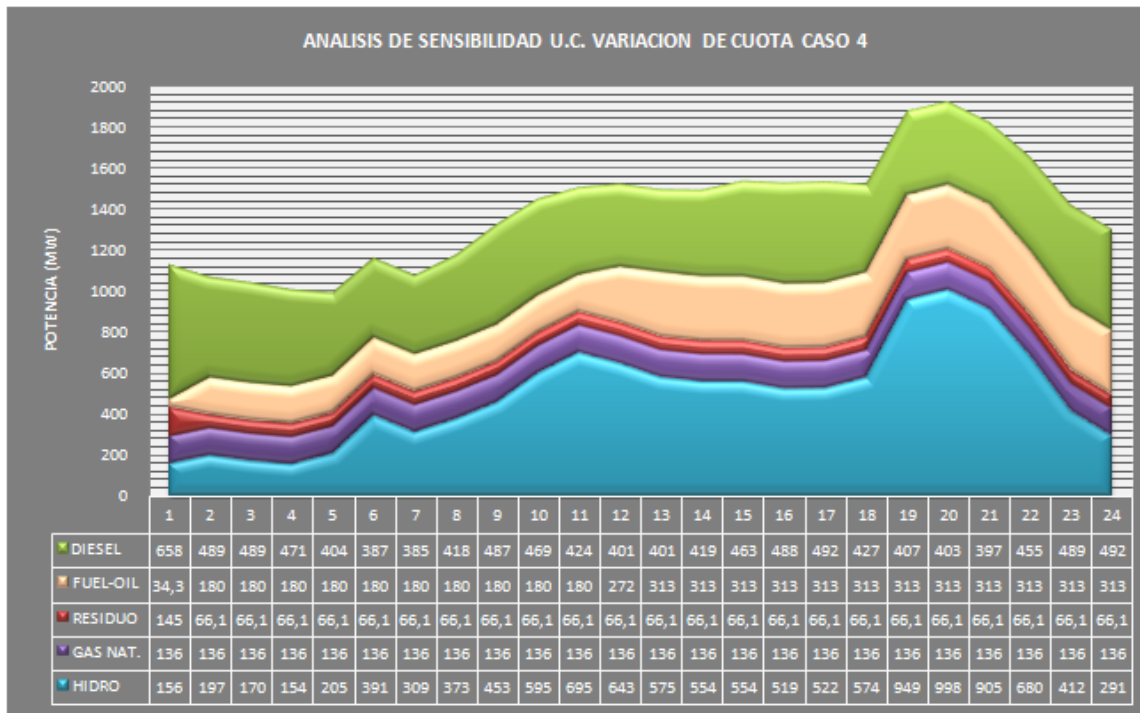
Gráfica 72. Emisiones de CO₂ horarias por tipo de combustible, Sensibilidad ante la cuota hidráulica, Caso 3.



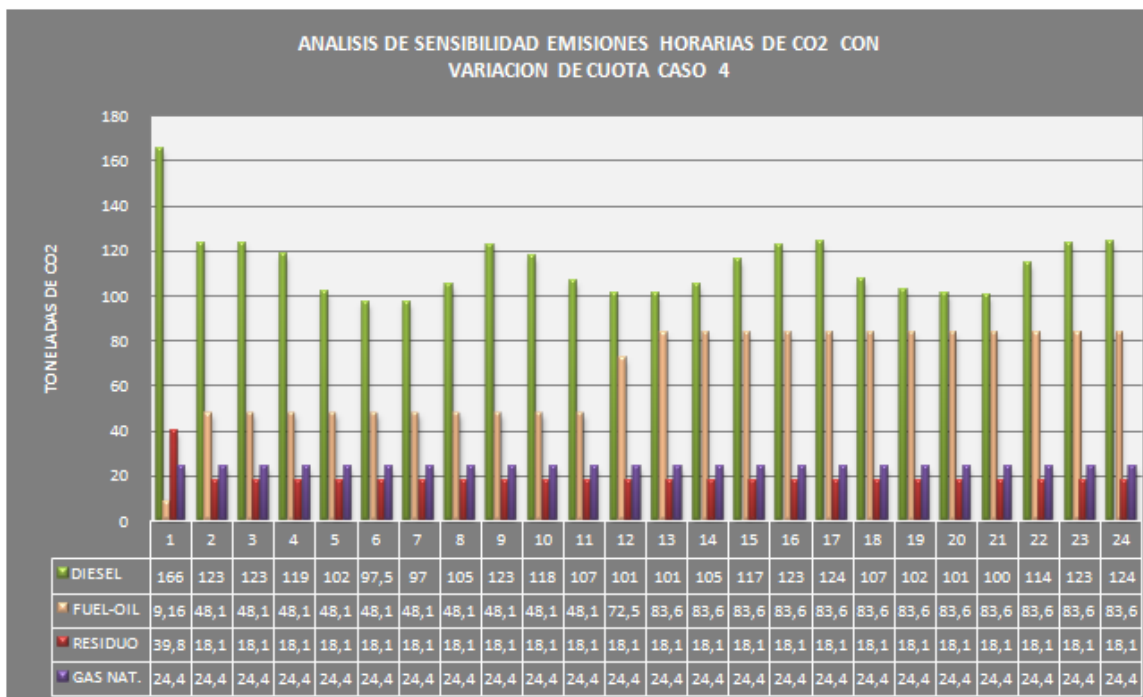
Gráfica 73. Porcentaje de emisiones de CO2 totales, Sensibilidad ante la cuota hidráulica, Caso 3.

TIPO DE COMBUSTIBLE	TOTAL DE EMISIONES EN TON. CO ₂
DIESEL	2706.05
FUEL-OÍL	1849.44
RESIDUO	456.88
GAS NATURAL	585.106
EMISIÓN TOTAL DE CO₂	5597.48

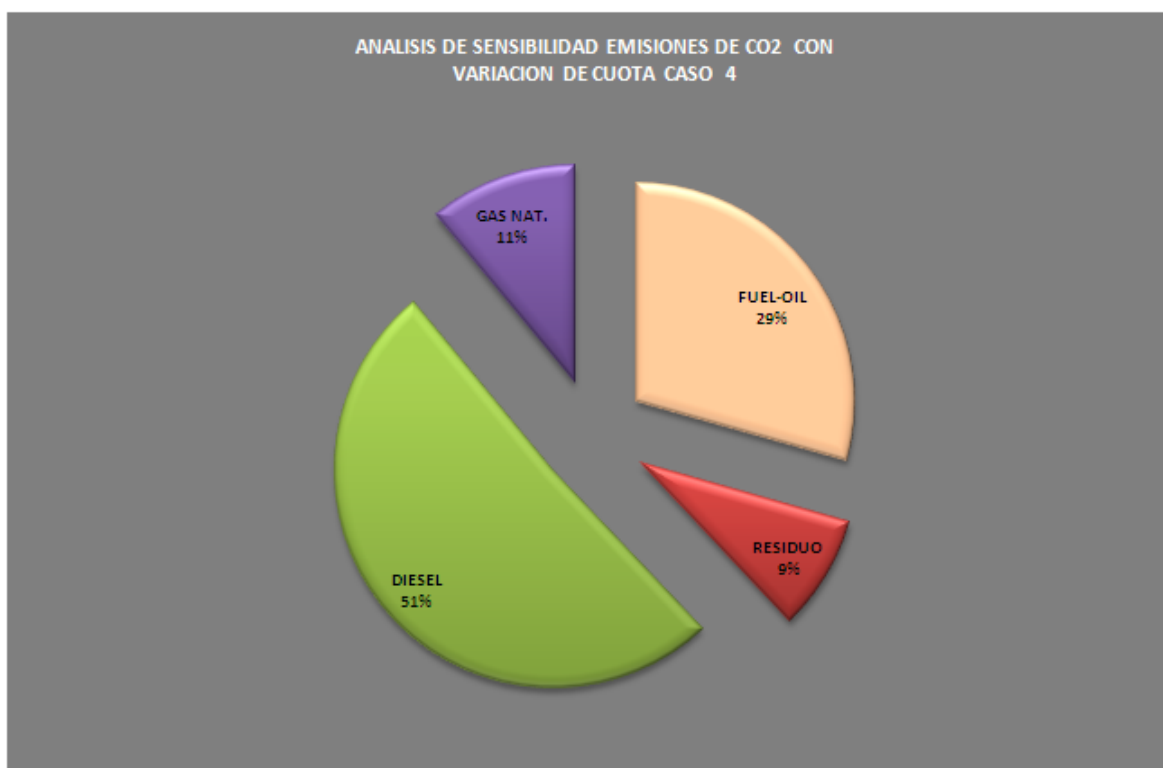
Tabla 27. Total de emisiones de CO₂ por tipo de combustible, Sensibilidad ante la cuota hidráulica, Caso 3.



Gráfica 74. Selección Técnica económica de unidades de acuerdo al tipo de combustible, Sensibilidad ante la cuota hidráulica, Caso 4.



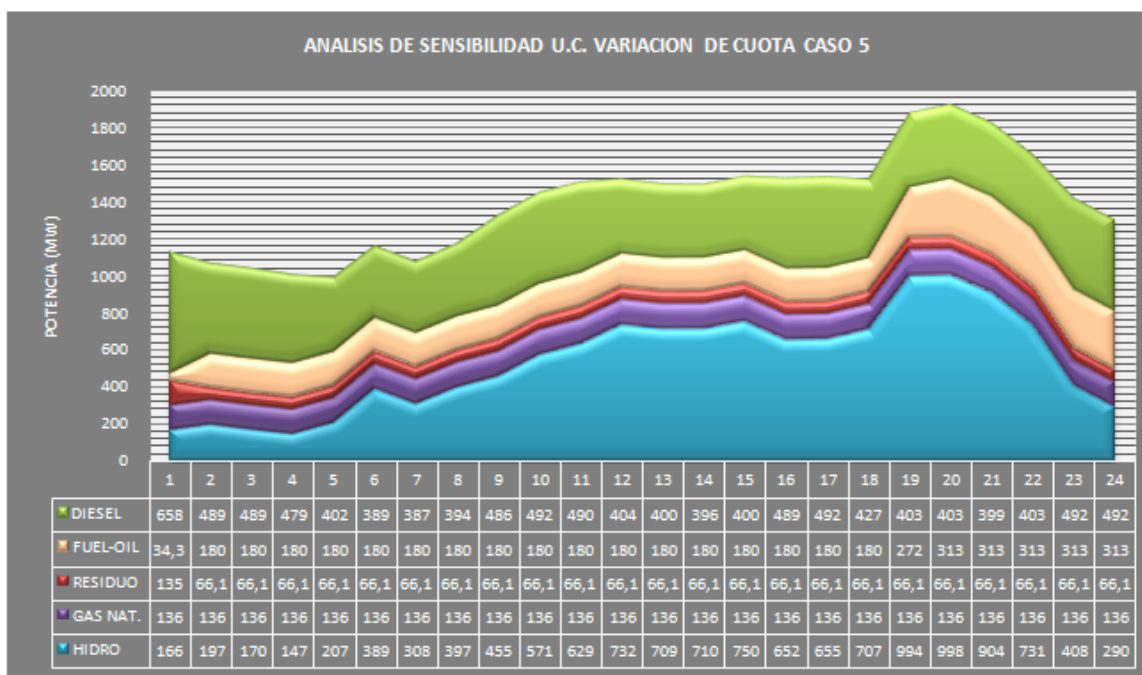
Gráfica 75. Emisiones de CO₂ horarias por tipo de combustible, Sensibilidad ante la cuota hidráulica, Caso 4.



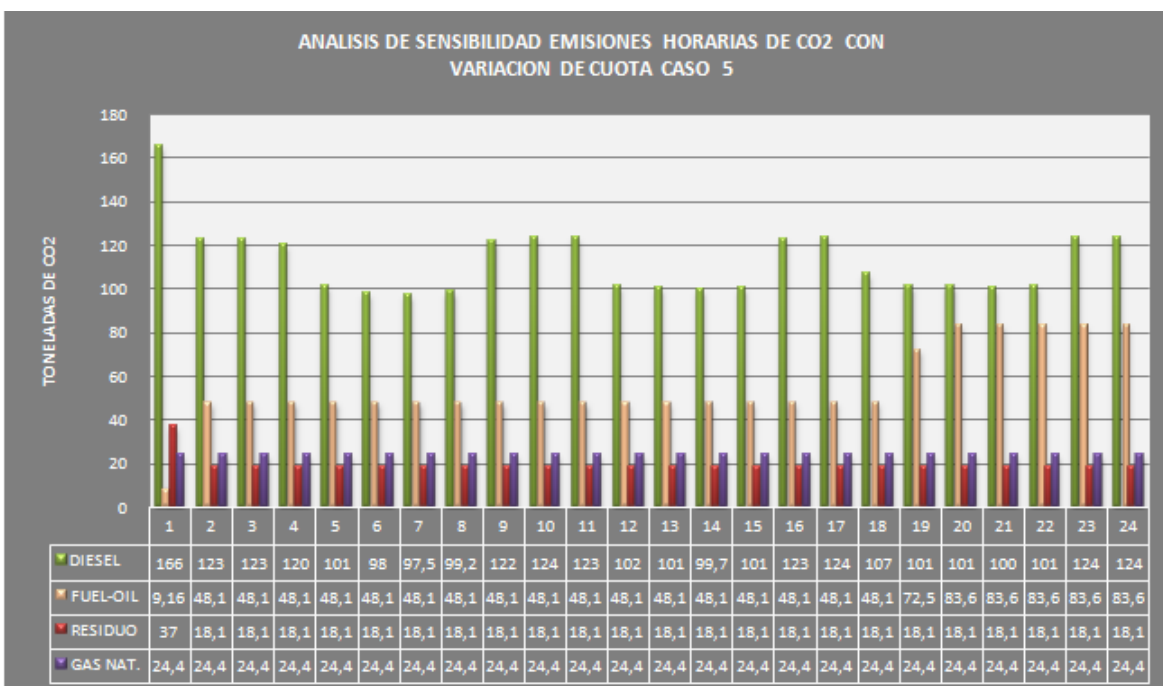
Gráfica 76. Porcentaje de emisiones de CO₂ totales, Sensibilidad ante la cuota hidráulica, Caso 4.

TIPO DE COMBUSTIBLE	TOTAL DE EMISIONES EN TON. CO ₂
DIESEL	2722.15
FUEL-OÍL	1565.62
RESIDUO	456.88
GAS NATURAL	585.106
EMISIÓN TOTAL DE CO₂	5329.77

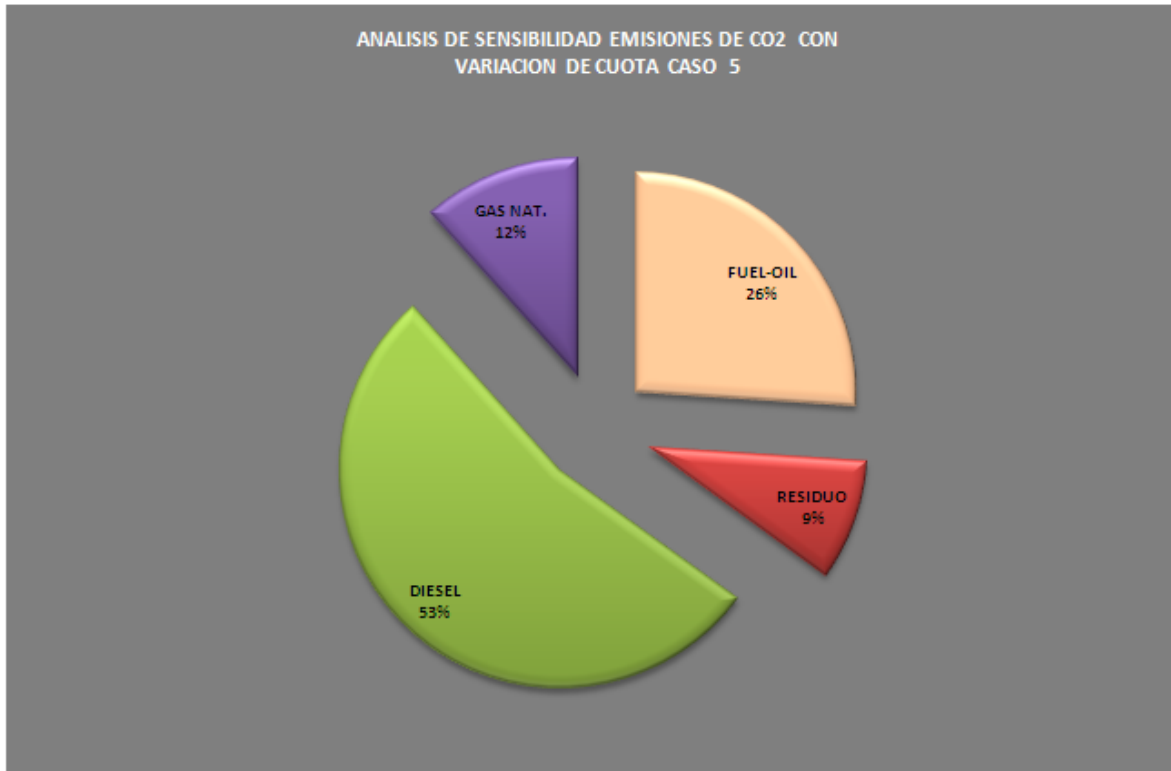
Tabla 28. Total de emisiones de CO₂ por tipo de combustible, Sensibilidad ante la cuota hidráulica, Caso 4.



Gráfica 77. Selección Técnica económica de unidades de acuerdo al tipo de combustible, Sensibilidad ante la cuota hidráulica, Caso 5.



Gráfica 78. Emisiones de CO₂ horarias por tipo de combustible, Sensibilidad ante la cuota hidráulica, Caso 5.



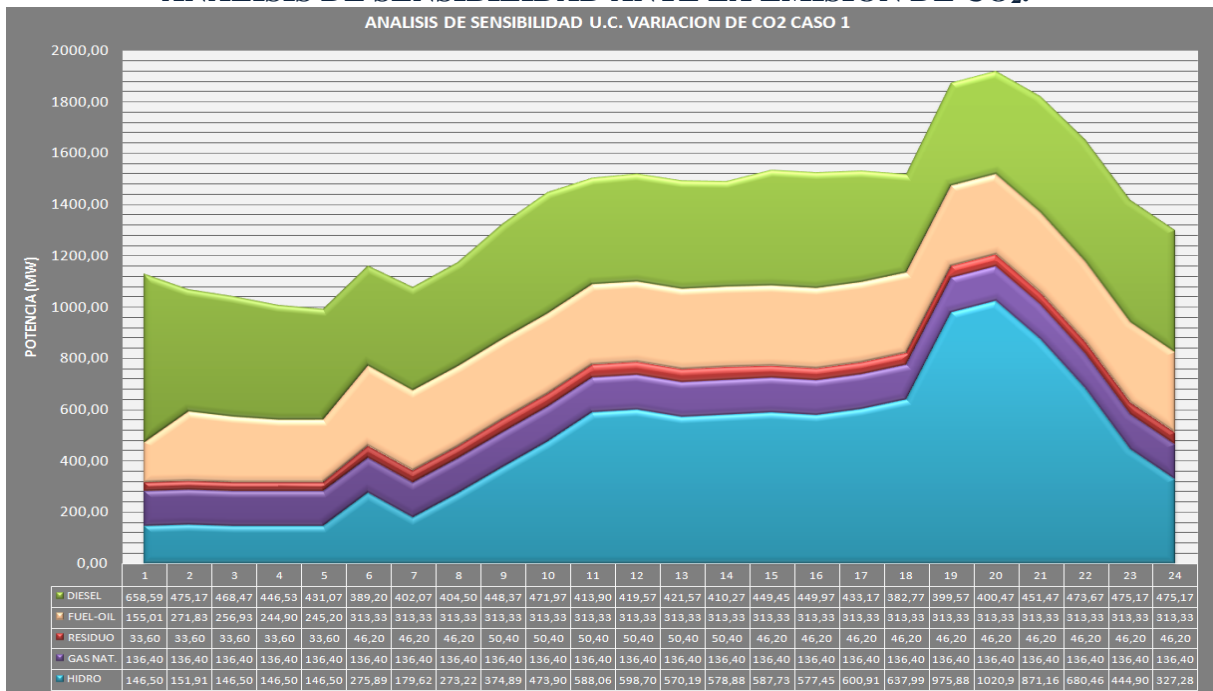
Gráfica 79. Porcentaje de emisiones de CO2 totales, Sensibilidad ante la cuota hidráulica, Caso 5.

TIPO DE COMBUSTIBLE	TOTAL DE EMISIONES EN TON. CO ₂
DIESEL	2707.30
FUEL-OÍL	1317.28
RESIDUO	454.13
GAS NATURAL	585.106
EMISIÓN TOTAL DE CO₂	5063.84

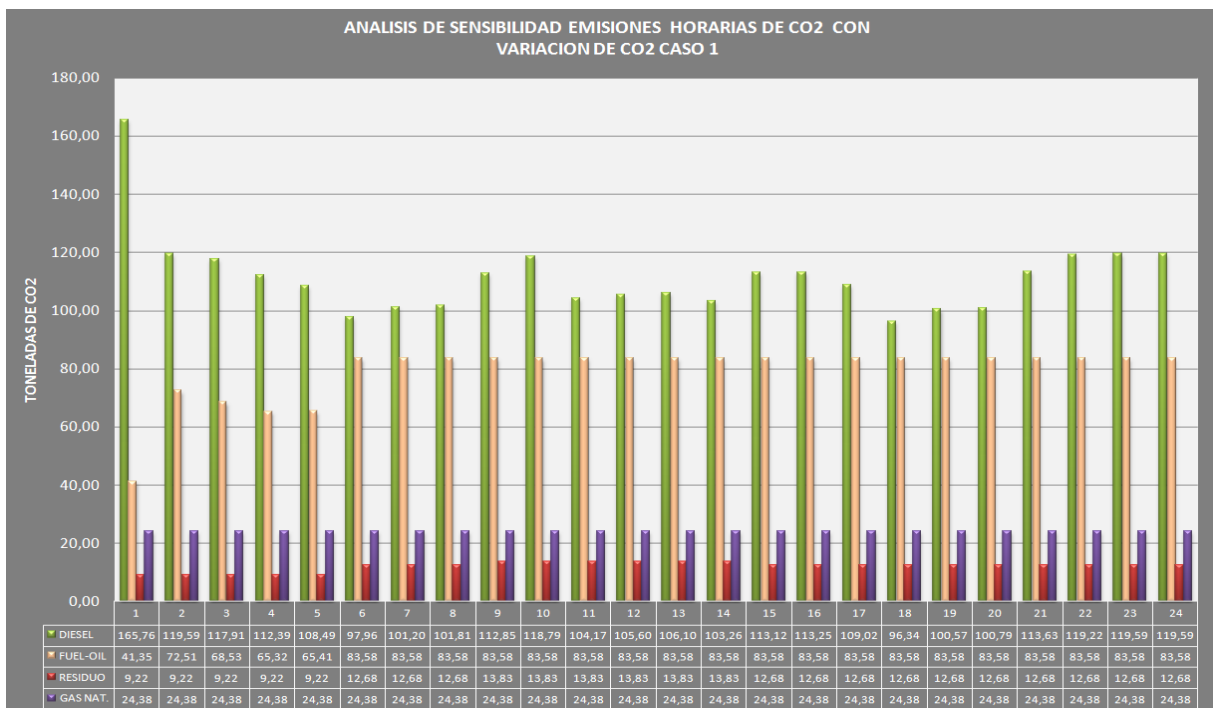
Tabla 29. Total de emisiones de CO₂ por tipo de combustible, Sensibilidad ante la cuota hidráulica, Caso 5.

ANEXO 4

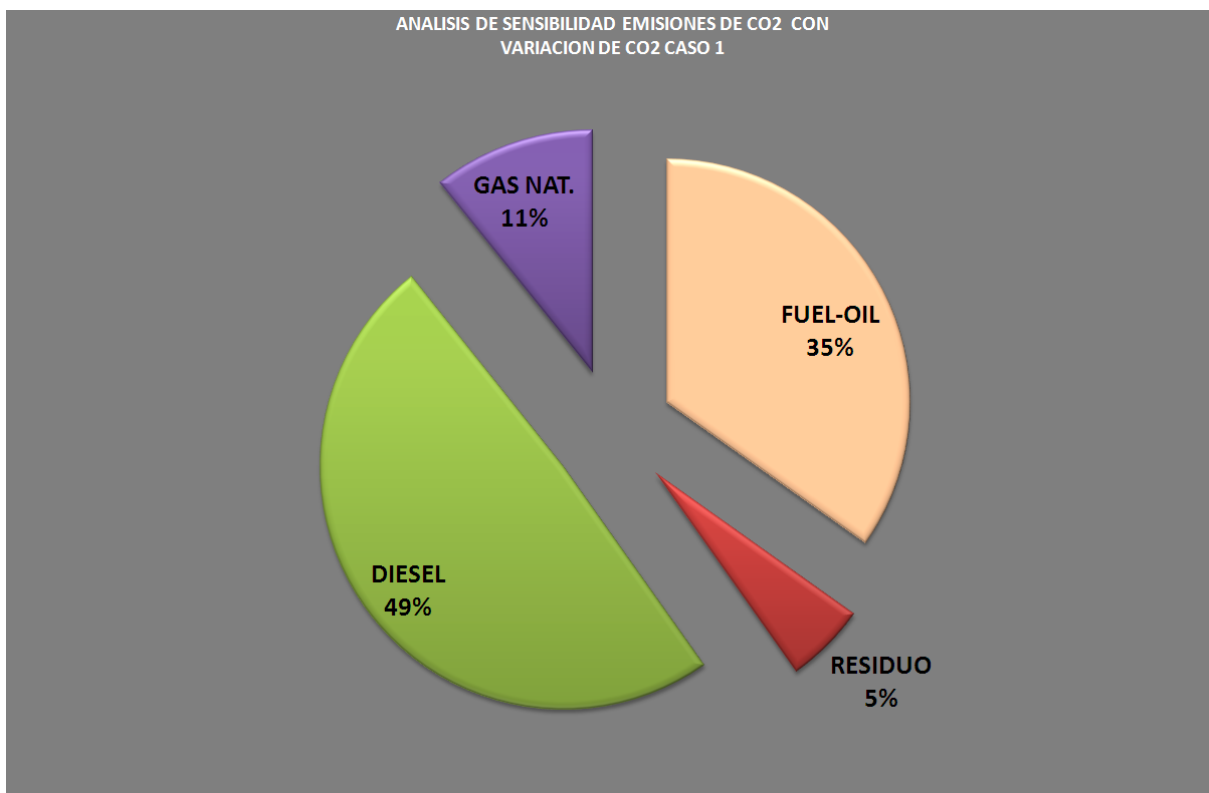
ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD ANTE LA EMISIÓN DE CO₂.



Gráfica 80. Selección Técnica económica de unidades de acuerdo al tipo de combustible, Sensibilidad ante la emisión de CO₂, Caso 1.



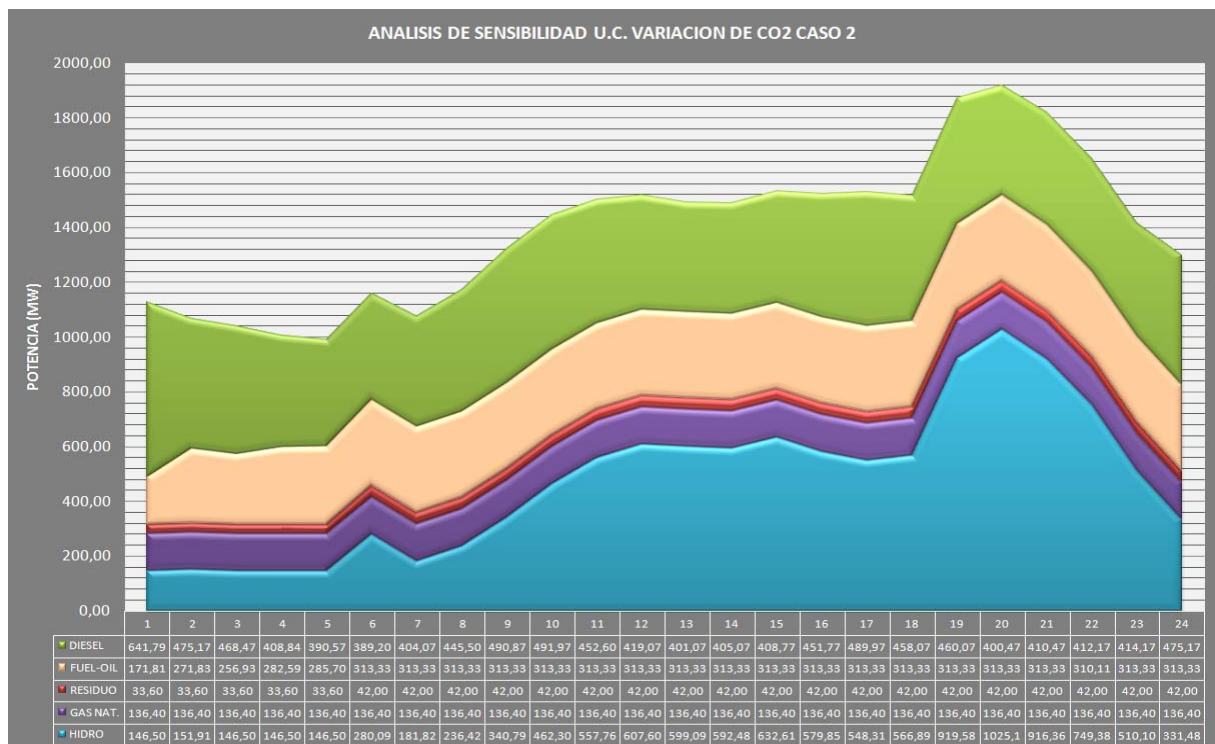
Gráfica 81. Emisiones de CO₂ horarias por tipo de combustible, Sensibilidad ante la emisión de CO₂, Caso 1.



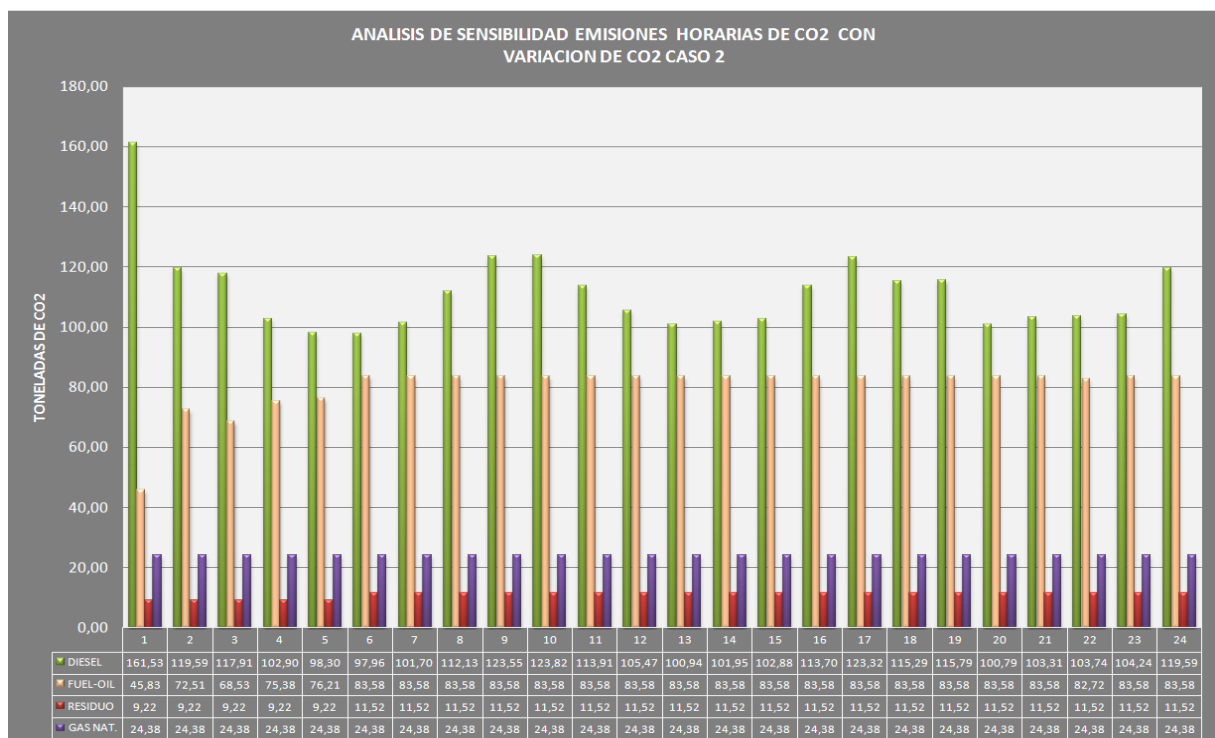
Gráfica 82. Porcentaje de emisiones de CO₂ totales, Sensibilidad ante la emisión de CO₂, Caso 1.

TIPO DE COMBUSTIBLE	TOTAL DE EMISIONES EN TON. CO ₂
DIESEL	2681
FUEL-OÍL	1901.11
RESIDUO	293.85
GAS NATURAL	585.11
EMISIÓN TOTAL DE CO₂	5461.08

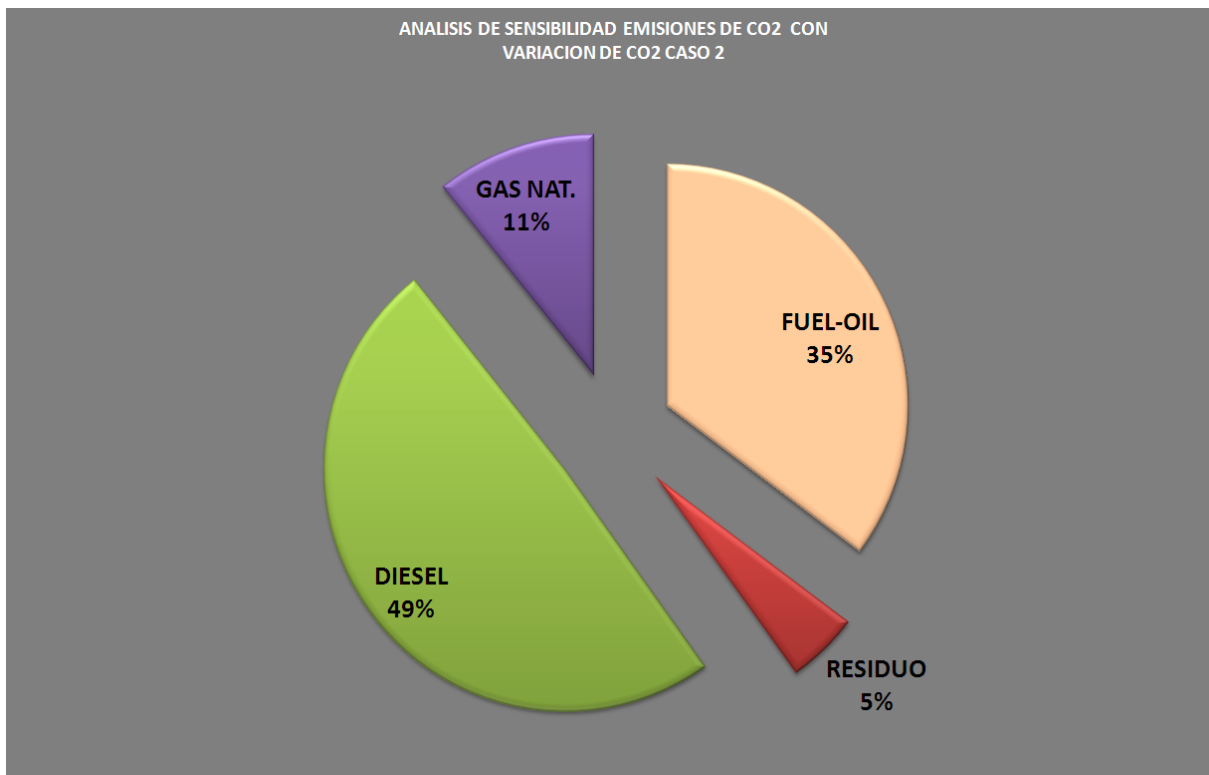
Tabla 30. Total de emisiones de CO₂ por tipo de combustible, Sensibilidad ante la emisión de CO₂, Caso 1.



Gráfica 83. Selección Técnica económica de unidades de acuerdo al tipo de combustible, Sensibilidad ante la emisión de CO₂, Caso 2.



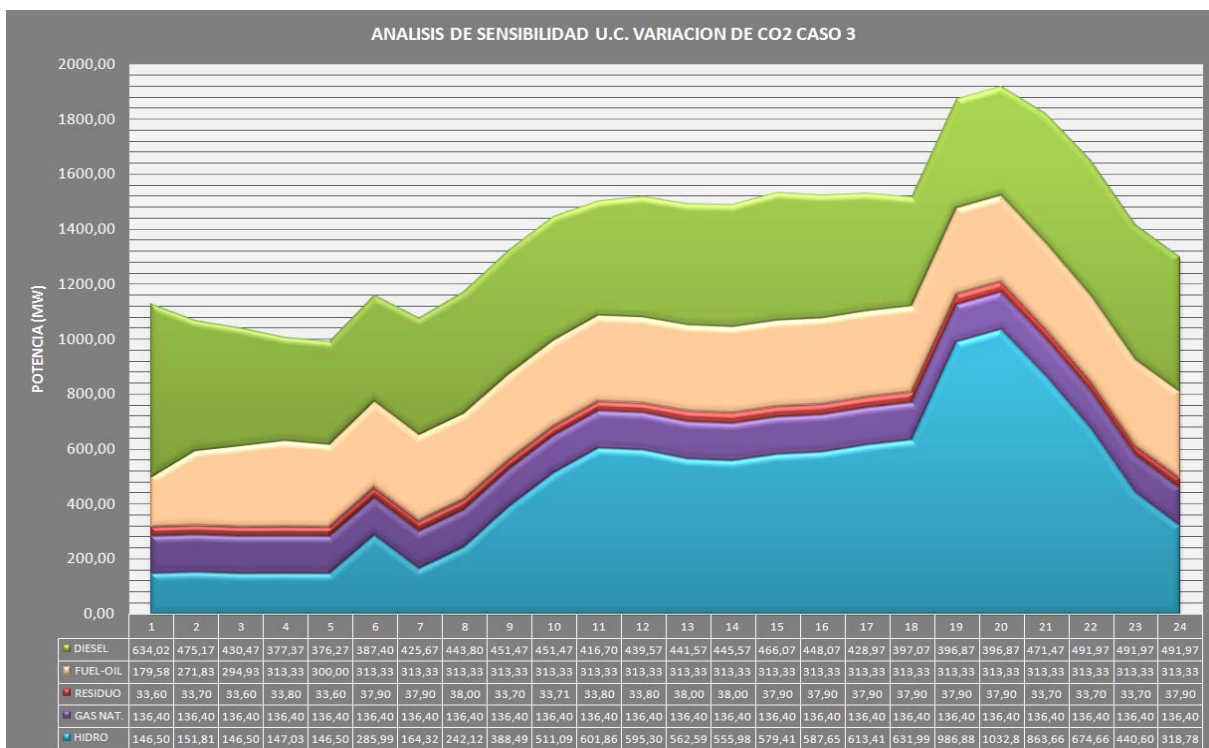
Gráfica 84. Emisiones de CO₂ horarias por tipo de combustible, Sensibilidad ante la emisión de CO₂, Caso 2.



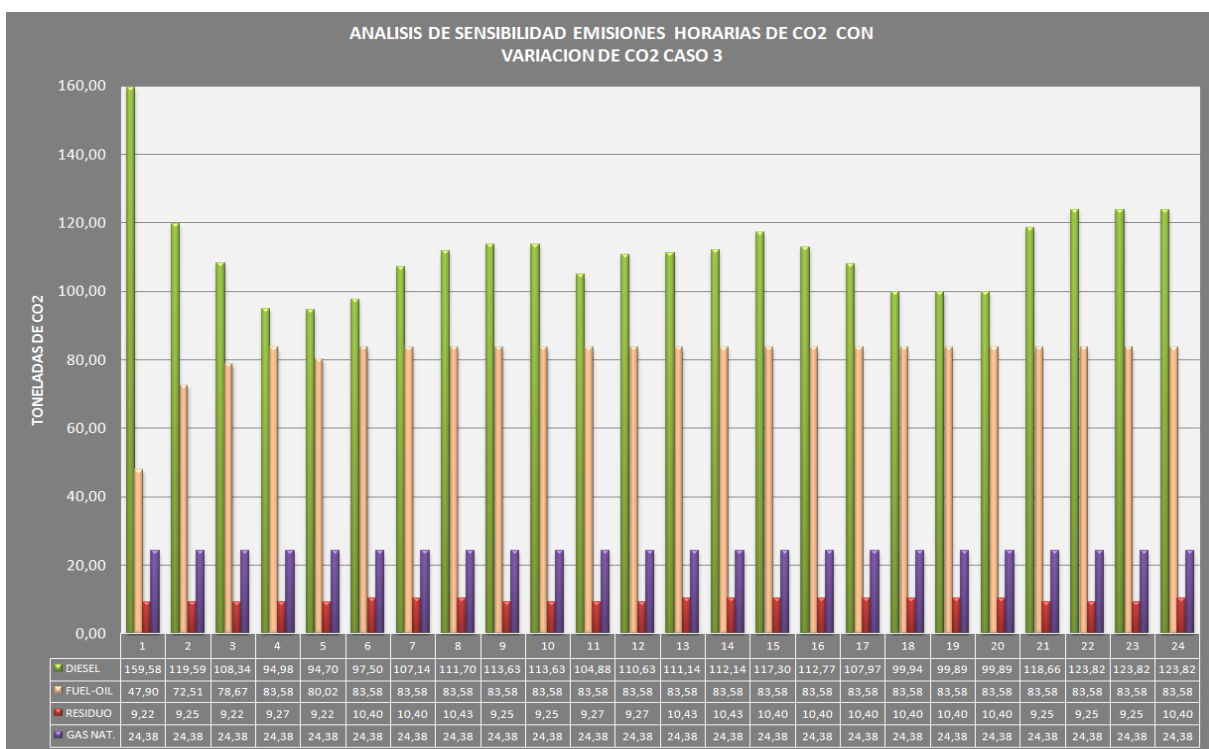
Gráfica 85. Porcentaje de emisiones de CO2 totales, Sensibilidad ante la emisión de CO2, Caso 2.

TIPO DE COMBUSTIBLE	TOTAL DE EMISIONES EN TON. CO ₂
DIESEL	2684.33
FUEL-OÍL	1925.59
RESIDUO	265.04
GAS NATURAL	585.11
EMISIÓN TOTAL DE CO₂	5460.08

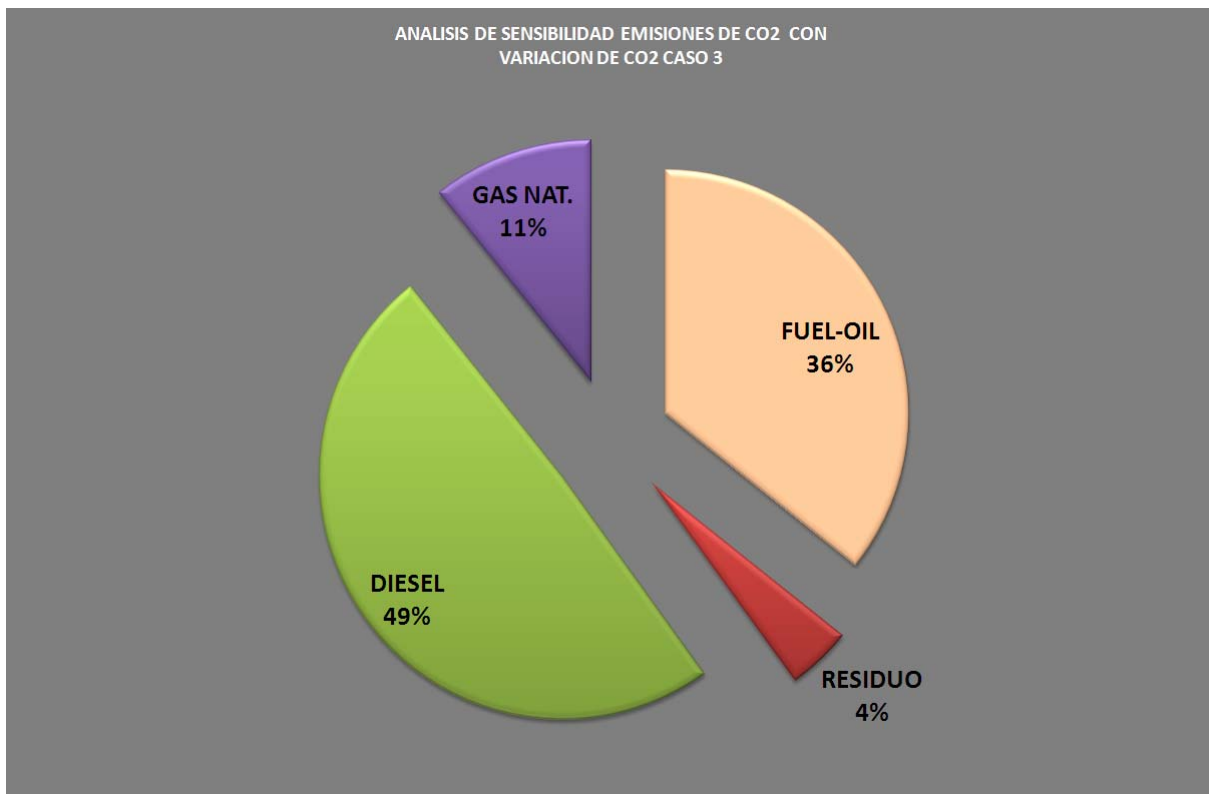
Tabla 31. Total de emisiones de CO2 por tipo de combustible, Sensibilidad ante la emisión de CO2, Caso 2.



Gráfica 86. Selección Técnica económica de unidades de acuerdo al tipo de combustible, Sensibilidad ante la emisión de CO₂, Caso 3.



Gráfica 87. Emisiones de CO₂ horarias por tipo de combustible, Sensibilidad ante la emisión de CO₂, Caso 3.



Gráfica 88. Porcentaje de emisiones de CO₂ totales, Sensibilidad ante la emisión de CO₂, Caso 3.

TIPO DE COMBUSTIBLE	TOTAL DE EMISIONES EN TON. CO ₂
DIESEL	2687.47
FUEL-OÍL	1950.67
RESIDUO	235.82
GAS NATURAL	585.11
EMISIÓN TOTAL DE CO₂	5459.08

Tabla 32. Total de emisiones de CO₂ por tipo de combustible, Sensibilidad ante la emisión de CO₂, Caso 3.